

Title	産業システムにおけるオートチューニングに関する研究(Dissertation_全文)
Author(s)	岩崎, 隆至
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	1998-01-23
URL	http://dx.doi.org/10.11501/3133247
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	author

産業システムにおける
オートチューニングに関する研究

1997年

岩崎隆至

目次

1. 緒論	1
1. 1 研究の背景	1
1. 2 オートチューニング方式の現状と動向	2
1.2.1 プラント制御用PIDコントローラにおけるオートチューニング	2
1.2.2 機構制御用サーボコントローラにおけるオートチューニング	4
1. 3 本研究の目標と構成	5
2. 制御対象のクラス分けを用いたファジィオートチューニング	7
2. 1 はじめに	7
2. 2 制御対象のクラス分けを付加したファジィオートチューニング法	8
2. 3 一次遅れ+むだ時間系への適用	10
2.3.1 定式化と目標仕様	10
2.3.2 PIパラメータ設定の方針	11
2.3.3 提案方式の適用	13
2.3.4 特徴量とファジィルール	13
2.3.5 オートチューニング手順	16
2. 4 シミュレーション結果	20
2. 5 テストプラントによる実験	23
2. 6 おわりに	27
3. ファジィ推論による同定を用いたオートチューニング	29
3. 1 はじめに	29
3. 2 ファジィ推論を用いた制御対象の同定	30
3. 3 オートチューニングへの応用	31
3. 4 プラント制御系におけるオートチューニング	33
3.4.1 一次遅れ+むだ時間系への適用	33
3.4.2 シミュレーション結果	37
3. 5 モータ制御系における負荷慣性モーメントの同定とオートチューニング	40
3.5.1 モータ制御系への適用	40
3.5.1 実験結果	42
3. 6 おわりに	46

4. オペレータノウハウを考慮したサーボ系のオートチューニング	47
4. 1 はじめに	47
4. 2 オートチューニング方式の構成	48
4. 3 サーボ系の制御パラメータ調整	49
4. 4 慣性モーメントの同定と機械振動の抑制への適用	50
4.4.1 オペレータノウハウ部	50
4.4.2 同定・設計部	51
4.4.3 アルゴリズム	51
4. 5 実験結果	51
4. 6 おわりに	57
5. 高精度軌跡制御のための2自由度サーボ系とオートチューニング	59
5. 1 はじめに	59
5. 2 高精度軌跡制御のための2自由度サーボ系とオートチューニング	60
5.2.1 メカニカルシステムの運動方程式	60
5.2.2 2自由度サーボ系の構成	60
5.2.3 制御定数のオートチューニング	63
5. 3 実験結果	66
5.3.1 2自由度サーボ系による高精度化	66
5.3.2 オートチューニング結果	71
5. 4 おわりに	71
6. 高精度軌跡制御における限界速度の自動設定	75
6. 1 はじめに	75
6. 2 限界速度の自動設定	76
6.2.1 指令速度のオートチューニング	76
6.2.2 設定アルゴリズム	76
6. 3 実験結果	79
6. 4 おわりに	83
7. 結論	85
参考文献	89
謝辞	93
研究発表	95

1. 緒論

1. 1 研究の背景

ダイナミカルシステムの制御においては、通常、まず補償器の構造を決定し、その後パラメータの値を設定する。特に、実際の産業システムにおいては、コントローラの実装上の制限から補償器の構造は予め決められており、設計の自由度はパラメータの値の設定のみである場合が多い。通常、この補償器のパラメータ設定は人手によって行われるが、オートチューニングとは、この設定作業を、何らかの制御系動作中のデータをもとに自動的に行う方式の1つである。

補償器のパラメータの自動設定を行う方式としては、リアルタイムにパラメータを修正していくもの（例えば、セルフチューニングレギュレータなどの適応制御[1]）と、ある時間間隔のデータを解析しチューニングを行うものがある。本論文では、後者の方式をオートチューニングと呼ぶことにする。このオートチューニングは、広い意味では適応制御の一種と言えるが、前者の狭義の適応制御と違って、リアルタイムの計算量をほとんど増やすことなく自動パラメータ設定が可能になり、従来からあるコントローラに付加しやすい実用的なアルゴリズムが得られる。

オートチューニングが有用な産業システムの具体例としては、プラント制御用PIDコントローラや機構制御用サーボコントローラといった様々な制御対象に使用される汎用コントローラがあげられる。プラント制御用PIDコントローラは、PID（Proportional-Integral-Derivative）制御を行うもので、現場での経験が蓄積された信頼性の高いフィードバックコントローラとしてプラント制御の分野で数多く使用されている。一方、モータのフィードバック制御を行うサーボコントローラは、機構制御の分野で一般的に用いられている。このサーボコントローラにおいても、PID制御を基本としているものが多い。

これらの汎用的なコントローラにおいては接続される制御対象が予め明らかでないため、補償器のパラメータの値は、制御対象に関わらず前もって設定された既定値をそのまま用いるか、あるいは制御対象接続後に何らかの設定作業を行って、決定される。しかし、通常、既定値の使用は保守的な制御性能しか得ることができず、設定作業は熟練した作業員と作業時間が必要となり、何らかの改善策が必要とされている。

また、実際の産業システムにおいても、従来のPID制御から得られる性能では満足できず、先進的な制御方式を導入しようとする試みが数多く行われている。特に汎用コ

ントローラにおいて、2自由度制御などの先進的な制御方式を導入しようとした場合、新しい制御方式のパラメータ設定には通常熟練した作業者が存在しないため、そのパラメータの設定作業が問題となる場合が多い。何らかの形でパラメータ設定が容易になる仕組みを用意しておく必要がある。

オートチューニングはこれらの問題点への解決策の一つとして提案されるものであり、その実現により産業システムにおいて以下のような利点が得られる。

- 1) 立ち上げ時の設定作業の省力化
- 2) 適切なパラメータ設定による制御性能の向上
- 3) 作業者の熟練度に影響されない安定した制御性能の実現
- 4) 制御対象の経年変化に影響されない安定した制御性能の実現
- 5) 産業システムへの先進的制御方式導入の容易化

1. 2 オートチューニング方式の現状と動向

1.2.1 プラント制御用PIDコントローラにおけるオートチューニング

オートチューニングの研究と実用化は、プラント制御用PIDコントローラにおいて早くから行われている[2-16]。その理由としては、プラント制御用PIDコントローラは、適用される制御対象が多岐に渡り必ずしも適切なパラメータ設定が実現できていないことがあること、大規模なプラントの制御を行う場合には1つのプラントに対し多くのPIDコントローラが用いられる場合が多くその調整作業が問題になること、などが考えられる。

PIDコントローラにおける補償器のパラメータの設定法としては、設定に用いるデータ、方式によって、表1.1のように大きく分類することができる。表1.1において、I、IIは調整に使用するデータの性質による分類である。すなわち、Iの特徴量データとは、閉ループ系の出力から得られる制御性能評価値、例えばステップ応答時の立ち上がり時間、オーバシュート量などであり、IIの時間・周波数データとは、出力の時系列データ、あるいはそれをフーリエ変換したものである。一方、A、Bは制御対象モデルを陽に持つかどうかという方式に関する分類である。Aの直接調整とは、プラント運転中のデータから直接コントローラパラメータを調整していく方法であり、Bの間接調整とは、まずデータから制御対象モデルあるいはこれに相当するものを同定し、制御系設計法によりパラメータを決定する方法である。

実際に作業により行われている設定作業の代表的なものとしては、最小2乗法により制御対象モデルのパラメータを同定し、最適なコントローラを設計する方式（領域4）や、“オーバシュートが大きければ比例パラメータを下げてみる”といった閉ループ系の応答に関するノウハウをもとに熟練作業者がパラメータを変更していく方式（領域1）がある。また、適応制御について考えると、モデル規範形適応制御は時間・周波数データによる直接調整（領域3）、セルフチューニングレギュレータは時

表1.1 制御系調整方式の分類

データ \ 方式	A. 直接調整	B. 間接調整
I 特徴量データ	1	3
II 時間・周波数データ	2	4

間・周波数データによる間接調整（領域4）に分類できる。

これまで研究されているプラント制御用PIDコントローラのオートチューニング方式の代表的なものに、同定・設計法とエキスパート法がある。同定・設計法は、時間データを用いた間接調整（領域4）に対応するものであり、まず同定用信号を加えて制御対象を同定し、その結果をもとに自動的にパラメータを決定する手法である。また、エキスパート法は、作業者の閉ループ調整におけるノウハウをそのままコントローラに取り込んだもので、特徴量データにもとづく直接調整（領域1）を実現している。

同定・設計法[6-8]は、制御対象の同定値にもとづいて最適なパラメータを決定できるので、広い範囲の対象に用いることができる一般的な手法である。しかし、従来の同定・設計法は、同定結果に誤差があるとその影響を受けやすいこと、正確な同定値を得るために制御対象に望ましくない同定信号を加える必要があること、同定するモデルに含めにくい特性に対する対応が困難であることなどの問題がある。一般的に、プラント制御においては外乱が比較的大きい場合が多く、また、通常動作時の入力に制御対象の同定に十分でない場合も多いため、時間・周波数データの利用には同定用信号の印加が必要となる。

一方、エキスパート法[3, 4, 9-16]は、たとえば、ジエグラ・ニコルスの限界感度法にもとづく方式やファジィ推論を応用した方式が提案されている。ジエグラ・ニコルスの限界感度法[17]は、制御ループ内に非線形要素を挿入し、その場合に生じるリミットサイクルの周期と振幅からPIDパラメータを設定するものであり、この手順をそのまま用いたオートチューニング方式が報告されている[4]。しかし、限界感度法が適用できる制御対象の範囲は限られており、たとえばむだ時間が大きな制御対象については良好な結果が得られない[18]。

また、他のエキスパート法として、ルールベースの推論を行う方式[9-11]が提案されている。この方式は、作業者が実際に行うパラメータ設定作業のノウハウをそのままコントローラに搭載したものであるが、数値データを扱うことに適していない推論を

用いているため、パラメータが収束するまでに時間を要するという問題点がある。

この収束性の遅さを改善する方式として、ファジィ推論を用いたオートチューニング方式[12-16]が提案されている。ファジィ推論は、推論の入出力として数値を扱えるため、パラメータの値を修正するオートチューニングに適した推論方式といえる。代表的なファジィオートチューニング方式は、まず適当な初期パラメータにより制御系を動作させ、動作中のデータからオーバシュート量などの特徴量を抽出し、それを入力とするファジィ推論を行うことによりパラメータの修正量を決定する。このパラメータの修正を繰り返して行うことにより最終的に適切なパラメータを得ることができる。この方式は、上述の時間データによる間接調整に比べ、特徴量という制御性能評価値を直接確認しながら通常運転中にパラメータ設定を行うことができる、ルールベースであるため定性的な設計仕様が組み込みやすいという特長がある。しかし、作業からの知識獲得の困難さ、適用可能な制御対象の範囲の不明確さなどの問題がある。

1.2.2 機構制御用サーボコントローラにおけるオートチューニング

機構制御系における制御対象は、プラント制御系の制御対象と比べると、モデル化が容易で外乱の性質も明らかな場合が多い。その一方、要求される制御仕様は比較的厳しい。従って、機構制御系に対するオートチューニング方式は、最適なパラメータ調整が可能になる同定・設計法が適していると考えられる。

プラント制御の場合と同様に、機構制御用サーボコントローラのオートチューニングにおいても、これまで提案されている方式はエキスパート法と同定・設計法に分類できる。エキスパート法による方式は、ファジィ推論を用いた方式[19, 20]などが提案されているが、機構制御系で要求される上述の理由により設定パラメータの一般性の確認に問題がある。

同定・設計法において、機構の動特性モデルを陽に用いず、ノンパラメトリックな周波数特性を同定し、制御系を設計する方式[27-28]が提案されている。この方式では、正確な周波数特性を得るために同定用信号を必要とする。

機構制御系の制御対象は、数式モデルが比較的立てやすいため、物理的なパラメータの値を同定することにより、制御系設計を行える場合が多い。最も単純には、未知のパラメータが慣性モーメントのみの場合があり、その同定を主眼にした方式[22-26]が提案されているが、外乱推定用オブザーバの存在が前提となっている。

近年、機構系の高精度軌跡制御を実現するための先進的な制御方式[29-32]が提案されている。これらの方式は、機構系の数式モデルにもとづく方式である。また、同様の高精度軌跡制御を目的とした制御系において、オートチューニングを実現する方式が提案され始めている[33-36]。たとえば、外乱を推定するオブザーバを用いて摩擦や慣性モーメントの大きさを推定し補償する方式[33-35]が提案されているが、フィードバック制御系の構成が複雑でリアルタイムの計算量が増加し、またそれぞれ摩擦あるいは慣性モーメントのいずれかへの補償しか対象としていない。さらに、慣性モーメントや摩擦の大きさなどを同時に同定する方式が提案されている[36]が、これは制御対象に同定のための特別な信号の入力が必要な方式になっている。

高速高精度な機構制御の実現を目指した場合、フィードバック／フィードフォワード制御系の最適な設定はもちろん重要であるが、その制御系への指令値を適切なものにしておくことも重要である。機構に大きな衝撃を与えない指令値をカム曲線を用いて生成する方式[37]などが提案されているが、制御対象の特性まで含めた指令値生成部のオートチューニングについてはこれまで顕著な研究がない。

1. 3 本研究の目標と構成

本研究は、産業システムにおける実用的なオートチューニング方式の確立を目指したものである。ここでは、特徴量データのような通常動作中のデータを用い、間接調整のような適用可能な制御対象を明確にできる方式を目指した提案を行う。本論文で提案する方式は、表1.1の分類に従うと、大きく分けて次の3つである。

- (1) 制御対象の同定結果を利用した領域1（特徴量データ・直接調整）
- (2) 領域3（特徴量データ・間接調整）
- (3) 通常動作中のデータをもとにした領域4（時間データ・間接調整）

これらにおける研究の考え方は、以下のような方針にもとづいている。

- 1) 適用可能な制御対象の範囲の明確化と拡大
従来のオペレータのノウハウを取り込んだオートチューニング方式（ファジィオートチューニングなど）は、適用できる制御対象の範囲が明確でない場合が多かった。本研究では、この制御対象の範囲の明確化と拡大を目指す。
- 2) 動作中の（閉ループ制御中）データをもとにしたオートチューニング
同定用信号などチューニングのための特別な動作を制御対象に要求するのは好ましくなく、特に開ループでの動作を避けるという考え方をもとに、本研究では通常動作あるいはそれに近い動作からのデータをもとにオートチューニングを行う。ただし、特別な信号を加えないために、数回の繰り返し動作が必要になることは許容する。
- 3) モデル化の困難な制御対象特性に対する対応の実現
制御対象の同定結果をベースとする間接調整においても、モデル化されない制御対象特性への対応が要求される場合が多い。その対応の具体化を、オペレータノウハウの利用と間接調整の融合によって図る。
- 4) 新しい制御方式に対するオートチューニングの実現
熟練したオペレータの存在が期待しにくい新しい制御方式に対して、そのオートチューニングの実現を図る。
- 5) オートチューニングの考え方の指令値生成部への拡大
制御系全体を考慮して、指令値生成部のオートチューニングを行う考え方は従来あまりなされていない。この考え方は将来的に様々な展開が考えられるが、本研究ではその1つの具体例を実現する。

本論文の構成は以下のようになる。

第2章では、制御対象のクラス分けを用いたファジィオートチューニング方式を提案する。この方式は、特徴量を用いた直接調整方式であるファジィオートチューニングに対し、制御対象モデルの概略同定値を導入し、複数のファジィルール群を使い分けることによって、従来方式では不明確であった適用可能な制御対象の範囲の明確化と拡大を実現するものである。プラント制御の分野で代表的な制御対象特性である一次遅れ+むだ時間系に対するシミュレーションと実験により、方式の有効性を確認する。

第3章では、ファジィ推論による同定法とそのオートチューニングへの応用について述べる。この方式は、特徴量データを用いた間接調整を実現するものであり、閉ループ系の応答を確認しながらチューニングが行えるというファジィオートチューニングの特長を保ったまま、より一般的な制御系設計方式が利用できるようになる。ファジィ推論による同定法の有効性検証の対象として、一次遅れ+むだ時間系における一次遅れ時定数・むだ時間の大きさ・プラントゲインの3つの定数の同定、およびモータ制御系の慣性モーメントの同定を考え、それぞれについてシミュレーションまたは実験の結果を示す。

第4章では、オペレータノウハウを利用したオートチューニング方式を提案する。この方式は、第3章で述べたファジィ推論による同定法を用いたオートチューニングをベースに、モデル化されていない制御対象特性への対応を、オペレータのノウハウを組み込むことにより実現するものである。ファジィ推論による同定法が特徴量データにもとづいているため、オペレータノウハウの組み込みが容易に実現できる。具体例として、機械振動が生じた場合のフィードバックパラメータの制限について、実験による検証を行う。

第5章では、新しい制御方式に対するオートチューニングの具体例として、高精度軌跡制御のための2自由度サーボ系とそのオートチューニングについて述べる。このオートチューニング方式は、2自由度制御の構造上の特徴を利用して制御対象の同定を行い、その結果をもとにフィードバック補償器だけでなくフィードフォワード補償器のパラメータチューニングまで行う。同定するパラメータには、非線形要素である摩擦の大きさを含み、高精度な軌跡制御の実現を実験によって確かめている。

第6章では、指令値生成部におけるオートチューニングの例として、高精度軌跡制御における限界速度の自動設定について述べる。この方式は、第5章で述べた高精度軌跡制御のオートチューニングをベースに、予め指定された誤差範囲を満足する速度を繰り返し動作により自動的に設定するものである。指令値生成部のオートチューニングは様々な展開が考えられるが、この方式はその1つの具体例である。第5章と同様に、高精度軌跡制御における実験結果により有効性を確認する。

最後に、第7章で結論を述べ、将来の研究課題について述べる。

2. 制御対象のクラス分けを用いたファジィオートチューニング

2.1 はじめに

PID制御は、特にプラント制御の分野で長年の経験が蓄積された信頼性の高いフィードバック制御方式として数多く使用されている。このプラント制御におけるPID制御において、そのパラメータを自動的に設定するオートチューニングコントローラの提案がこれまで行われている[2-16]。ここで用いられるオートチューニング方式では、様々な特性の制御対象に適用可能なこと、通常運転中のチューニングが可能なことなどの要求がある。

通常運転中のチューニングが可能なオートチューニング方式として、野本ら[12, 13]および野村ら[15, 16]は、表1.1の領域1に対応する方式を提案している。すなわち、熟練作業員から獲得したファジィルールにもとづいて実際の調整作業と同じような手順でパラメータを決定する方式である。これらの方式では、あるパラメータにより閉ループ系を動作させ、動作中の信号から抽出された制御性能を直接表現する特徴量（例えば、ステップ応答におけるオーバシュート量や立ち上がり時間など）をもとに推論を行い、徐々にパラメータを修正し、最終的に適切なパラメータを決定している。これらの方式は、特徴量をもとにパラメータ修正を行うので制御対象の通常運転中にチューニングが可能なこと、繰り返しパラメータ修正を行うので閉ループ系の応答の改善の様子を確認でき外乱に強くなること、飽和対策のような通常の線形制御系設計法では扱いにくい定性的な設計仕様も取り込めることなどの特長がある。しかし、熟練作業員からの知識の獲得、特に予備知識や適応能力の獲得は一般に困難であること[38]、熟練作業員の知識は特定のプラントに対するものである場合が多いことなどの理由により、これらの方式では、想定した以外の特性を持つ制御対象に対しては必ずしも満足なチューニング結果が得られるとは限らない。

本章では、より一般的なファジィオートチューニング法として、制御対象を同定結果によりクラス分けし、そのクラスに適したルール群（同時に用いられる複数個のファジィルールの集合をルール群と呼ぶことにする）を選択して用いる方式を提案す

る。この方式は、表1.1の領域1と領域2の中間的な領域に相当するものといえ、複数の制御対象のクラスを扱うことができるので適用できる制御対象の範囲が広く、かつプラント動作中に応答を確認しながらチューニングが可能であるという特徴を持つ。

2. 2 制御対象のクラス分けを付加したファジオートチューニング法

オートチューニングの目的は、制御対象の特性に応じて、閉ループ系の応答が要求仕様を満たすようにPIDパラメータを決定することである。この要求仕様の例としては、安定でかつ高速な応答を得ること、制御対象の入力に飽和を生じないことなどがあげられる。ファジオートチューニングで用いられる特徴量、例えばステップ応答時のオーバシュート量、立ち上がり時間などは、この要求仕様に関する性能を直接示す尺度であり、この尺度により現状のPIDパラメータによる閉ループ系の性能を把握できる。この特徴量は、ノイズなどの影響を受けにくいものが望ましい。

一方、ファジオートチューニングで用いるファジルール群は、特徴量とパラメータの修正量との間の定性的な関係を表現するものである。すなわち、測定された特徴量に対し、要求仕様を満足するために、どのパラメータを増加あるいは減少させれば良いかという関係を表現する。このファジルール群は、オートチューニングの性格上、様々な特性の制御対象に有効であることが要求される。しかし、広い範囲の特性の制御対象に共通に効果的なルール群を求めることは困難である。なぜなら、オーバシュート量、立ち上がり時間などの特徴量は、主として周波数応答における交差周波数付近の特性を表わし、それ以外の周波数での特性を明確に表現しにくいいため、パラメータ設定の方針まで決定するには不完全な情報となるからである[18]。たとえば、オーバシュート量が大きすぎる場合、特徴量のみの情報からPIDのいずれのパラメータを修正して改善すべきかを決定することは困難である。

熟練作業者は、この特徴量をもとに良好なチューニングを実現している場合がある。しかし、この場合は、作業者の持つ背景知識や適応能力を用いてパラメータ設定方針の切り替えなどを行っているためと考えられる。一般に、背景知識のような深い知識を計算機上に実現することは困難である[38]。

そこで、制御対象を、単一のパラメータ設定方針で良好な結果を得られるクラスに分類し、その各クラスに対応して、異なるファジルール群を用意することを考える。これにより、各ファジルール群は、それぞれのパラメータ設定方針のみに対応すれば良いので、簡単になり実現しやすい。また、このように複数のルール群を用意して実現したファジオートチューニング法は、従来のものより適用できる制御対象の範囲が広がる。

本章で提案するファジオートチューニング方式は、以上の考えにもとづくもので、複数のファジルール群を持ち、それを選択してPIDパラメータ決定を行うものである。図2.1に本方式の概略構成図を示す。チューニング手順の概略としては、まず、制御対象モデルの同定を行い、同定結果をもとに制御対象を予め用意された制御対象モデルのクラスの1つに分類し、そのクラスに適したファジルール群を選択する。つぎに、閉ループ系の入出力（SV、PV）から抽出した特徴量をもとに、選択した

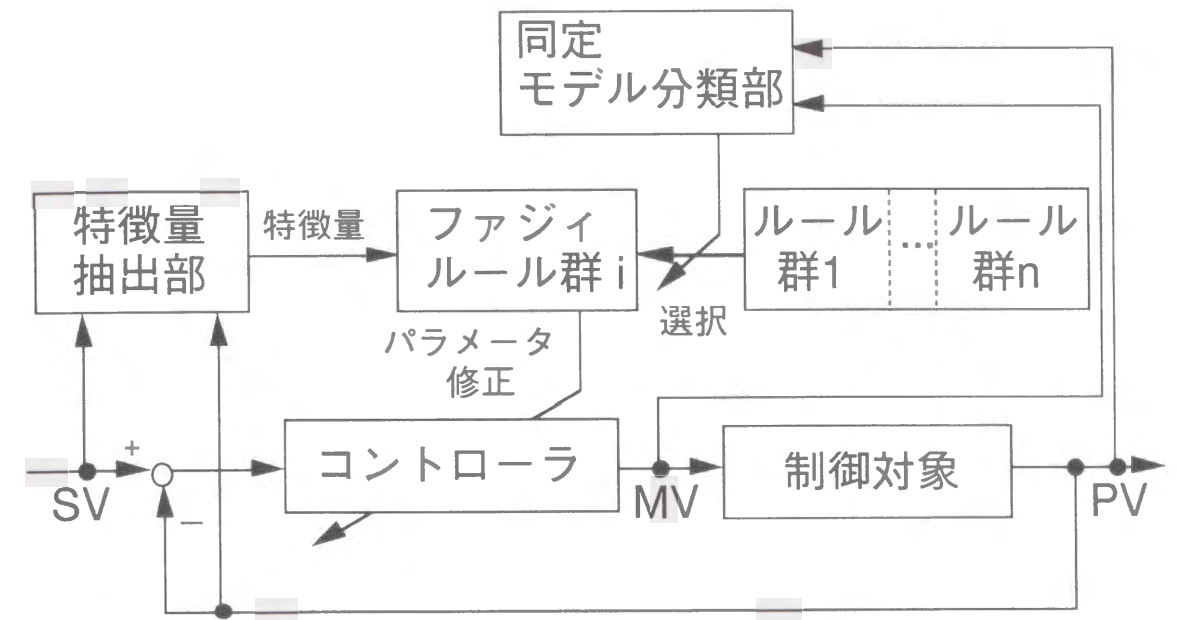


図2.1 制御対象のクラス分けを付加したファジオートチューニングの構成

ファジルール群を用いて、PIDパラメータを修正していく。この修正を何度か繰り返すことにより、望ましいPIDパラメータを得る。

提案した方式では、制御対象の特性が2つのクラスの境界近傍にある場合には、同定誤差により制御対象のクラス分けを誤る可能性がある。しかし、境界の両側で連続なPIDパラメータが得られるように両方のファジルール群を決めることによって、境界近傍の制御対象はどちらのクラスに分類されても、ほぼ良好なパラメータが得られることになる。従って、提案した方式では、同定誤差はチューニング性能に大きな影響を与えない。

本方式の特長をまとめると次のようになる。

- (1)従来のファジルールを用いた方式と同様に、制御対象の通常運転中にパラメータ修正の結果を確認しながらチューニングが可能のため外乱に強く、また定性的な設計仕様も容易に取り込める。
- (2)従来のファジ推論を用いた方式より、適用できる制御対象の範囲が広い。
- (3)同定結果はクラス分けにのみ使用されるので、同定誤差の影響は従来の同定・設計法より受けにくくなる。
- (4)ファジルール群は、限定されたモデルに適用できるようにすれば良いので、簡単になる。

2. 3 一次遅れ+むだ時間系への適用

一次遅れ+むだ時間で表わされる制御対象モデルは、プラント制御の分野で、典型的な制御対象の特性として一般的に用いられるものである。しかし、この一次遅れ+むだ時間系は、後述するように一次遅れ時定数とむだ時間の大きさの比によって特性が異なり、これらの特性のすべての範囲で良好な結果が得られる単一のファジィルール群を求めることは困難である。そこで、提案した方式を一次遅れ+むだ時間系に対してPI制御を行う場合に適用し、その有効性を検証する。

2.3.1 定式化と目標仕様

PIコントローラの伝達関数 $C(s)$ は次式で表わされる。

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{K_i s} \right) \quad (2.1)$$

ここで、 s はラプラス演算子、 K_p 、 K_i はそれぞれPIコントローラの比例、積分パラメータ（以下ではPIパラメータと呼ぶ）を示す。また、制御対象である一次遅れ+むだ時間系の伝達関数 $P(s)$ は、次式で表わされる。

$$P(s) = \frac{K_0 e^{-Ls}}{1 + Ts} \quad (2.2)$$

ここで、 K_0 はプラントゲイン、 L はむだ時間の大きさ、 T は一次遅れ時定数である。このPI制御系のブロック図を図2.2に示す。この適用例でのチューニングの目標仕様は、閉ループ系へのステップ入力に対する応答として、20%のオーバーシュートを持ち、立ち上り時間が可能な限り短いものを得ることである。また、定常外乱を除くためのIパラメータが大きくなりすぎないこと、通常の設定値変更に対しコントローラ出力(MV)に長時間飽和が生じないこととする。

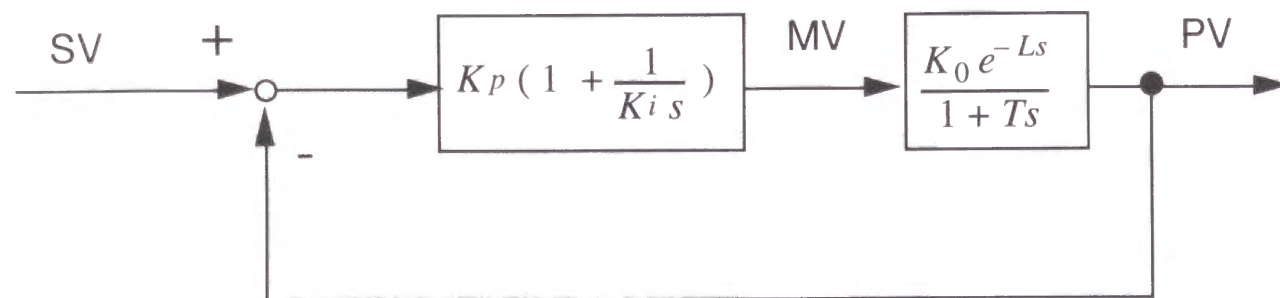


図2.2 PI制御系のブロック図

2.3.2 PIパラメータ設定の方針

ここでは、一次遅れ+むだ時間の制御対象に対するPIパラメータの設定方針について述べる。(2.2)式を $\tilde{s}=Ts$ で規格化することにより、

$$P(\tilde{s}) = \frac{K_0 e^{-(L/T)\tilde{s}}}{1 + \tilde{s}} \quad (2.3)$$

が得られ、 L/T の値が一次遅れ+むだ時間系の特性を表わす量であることがわかる。

様々な L/T の値を持つ一次遅れ+むだ時間の制御対象に、部分的モデルマッチング法[39]を用いてPIパラメータを決定した結果を表2.1に示す。部分的モデルマッチング法は閉ループ応答をモデルに一致させることを目標に制御パラメータを決定する設計法である。表に示した5種類の制御対象は、位相が180度遅れる周波数（以下では ω_a と表記）が1となるように規格化して L と T が選ばれている。また、 K_0 は簡単のため1とした。

表2.1より、部分的モデルマッチング法で得られたIパラメータの値は、 L/T が小さい場合（制御対象1～3）には T とほぼ一致し、 L/T が大きい場合（制御対象5）にはほぼ1になっている。言い換えると、 L/T が小さい場合には制御対象の一次遅れの折れ点周波数（以下では ω_r と表記、 $\omega_r=1/T$ ）とPIコントローラの積分の折れ点周波数（以下では ω_i と表記、 $\omega_i=1/K_i$ ）を一致させ、 L/T が大きい場合には ω_r と ω_i を一致させている。

しかし、制御対象1のような場合、積分補償の定常外乱除去の効果から考えると、部分的モデルマッチング法で得られたIパラメータの値は大きすぎ、望ましい値とはいえない。通常の古典的なフィードバック制御系設計法では、このような場合、交差周波数より一定割合低い周波数（たとえば1/10）に ω_i を設定することが行われる。

以上の検討の結果、一次遅れ+むだ時間系に対しては、 L/T の値に応じて3つの設定方針を切り換えることが必要であることがわかった。以下では、それぞれの設定方針が適用できる制御対象のクラスを、 L/T の値の小さいものから順に、遅れ系、中間系、むだ時間系と呼ぶこととする。それぞれのクラスの制御対象に対する設定方針は、次のようなものである。

表2.1 制御対象特性とPIパラメータ

制御対象	No.	1	2	3	4	5
	L/T	0.00157	0.0517	1.0	2.36	313
	L	1.57	1.60	2.03	2.36	3.13
	T	1000	31.0	2.03	1.0	0.01
部分的モデル マッチング法	K_p	319	9.74	0.59	0.33	0.22
	K_i	1000	31.0	2.19	1.35	0.97
本設計法	K_i	31.3	31.0	2.03	1.0	1.0

(1)遅れ系 ～ Iパラメータは ω_1 が交差周波数の1/10程度になるように設定し、Pパラメータは位相余裕などを考慮して決定する。

(2)中間系 ～ Iパラメータは、 ω_1 と ω_a とを一致させるように決め、Pパラメータは位相余裕などを考慮して決定する。

(3)むだ時間系 ～ Iパラメータは ω_1 と ω_a とを一致させるように決め、Pパラメータは位相余裕などを考慮して決定する。

参考のため、これらの方針にもとづいて決定したIパラメータの値を表2.1の下欄に示す。

図2.3は(2.2)式の制御対象のボード線図（ゲイン線図）の概略図を用いて、それぞれのクラスのPIパラメータの設定方針を示したものである。P(s)の図に示すように、一次遅れの折れ点周波数 ω_1 と位相が180度遅れる周波数 ω_a との大小関係は、L/Tの大きさにより決まる。それぞれのクラスに対する上述の設定方針によるPIコントローラ、および開ループ系の様子が、C(s)、P(s)C(s)として示されている。

なお、遅れ系と中間系との境界はL/T=0.052、中間系とむだ時間系の境界はL/T=2.36となる。これらの境界は、どちらの設定方針を用いても同じPIパラメータが得られる場合になっている。すなわち、境界付近の制御対象に対しては、どちらの設定方針を用いても、ほぼ良好なPIパラメータが得られる。

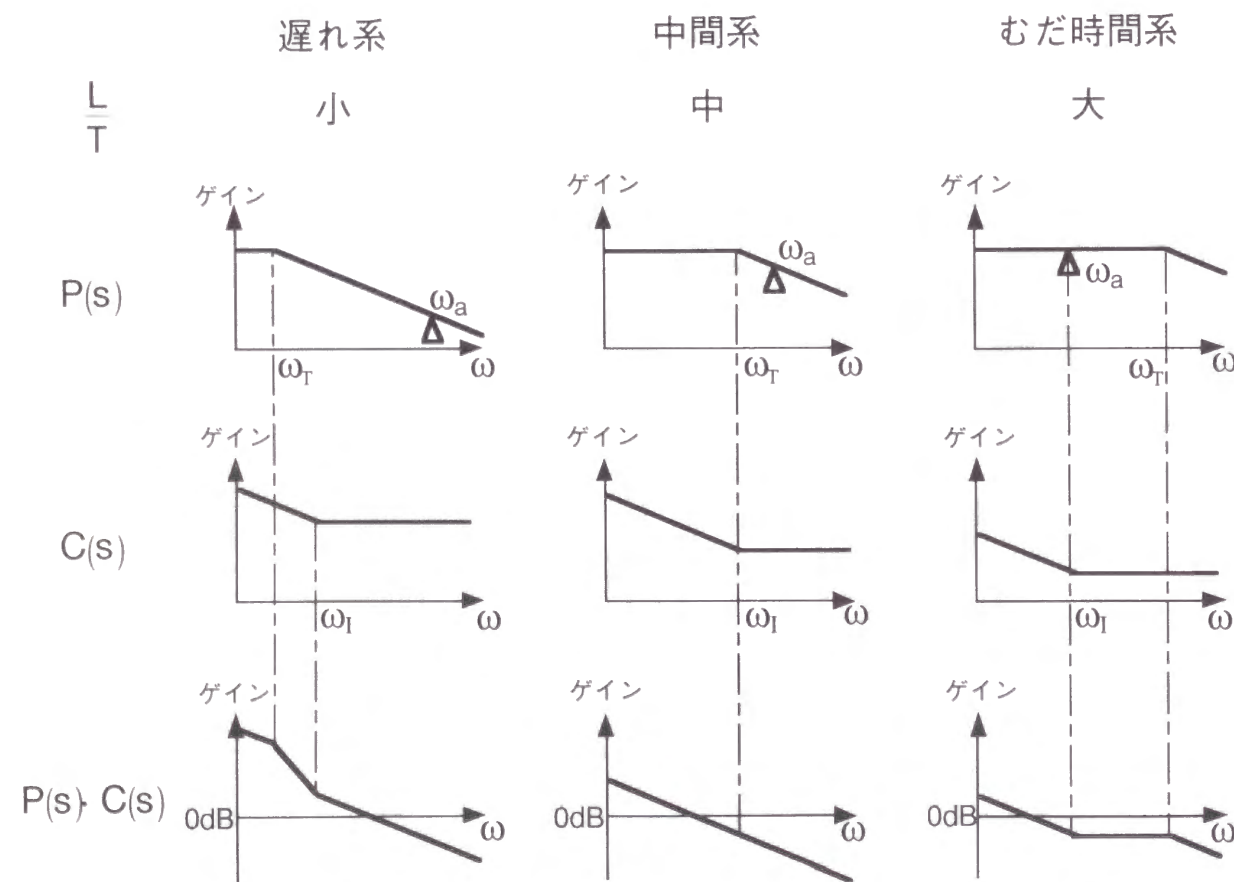


図2.3 一次遅れ+むだ時間系のクラス分けとPIパラメータ設定方針

2.3.3 提案方式の適用

前節において、一次遅れ+むだ時間の制御対象に対して3つの設定方針を使い分けることにより、良好なPIパラメータの設定が行えることを示した。しかし、これらの3つの設定方針を包含するような単一のファジイルール群を設定することは困難である。たとえば、調整作業の最終段階において交差周波数を少し下げたい場合を考える。この場合、遅れ系ではKpを小さくしそれに応じてKiを大きくする、中間系ではKpを小さくする、むだ時間系ではKiを大きくすることがそれぞれ適切であることが、図2.3および(2.1)式からわかる。このように3つの制御対象のクラスにより、それぞれ異なるルールが必要になる。

そこで、ファジィ推論によってチューニングを行う場合には、前章で提案した制御対象のクラス分けを付加したファジィオートチューニング方式を採用することが自然である。すなわち、L/Tの大きさによる3つのクラス（遅れ系、中間系、むだ時間系）に対し、PIパラメータを修正するためのファジイルール群をそれぞれ用意する。そして、LとTの値を同定し、L/Tの値によってファジイルール群を選択し、チューニングを行う。クラス分けのための同定は、Lについてはステップ応答時の入力と出力の立ち上がりのずれから求め、Tについては最小2乗法によって決定する。上述のように、今回用いるPIパラメータ設定方針は各クラスの境界で連続であるため、L/Tの同定誤差はチューニング結果に大きな影響を与えない。

2.3.4 特徴量とファジイルール

特徴量およびファジイルールは、PIパラメータが上述の制御系設定方針に従って修正されるように決定する。図2.4に各ルール群で用いる特徴量を示す。特徴量は、ステップ応答から抽出する。プラント制御における設定値(SV)変更は、制御対象の応答と比較して十分速くほぼステップ入力と見なすことができる場合が多いため、図2.4の特徴量は通常運転中に得られるものと考えてよい。特徴量OVはオーバシュート量で位相余裕の大きさを示す特徴量、OPはオーバシュート中の時間、CIは現在のIパラメータKiと立ち上がり時間の比で、言い換えると ω_1 （すなわちKi）と交差周波数の関係を示す特徴量、STはコントローラ出力(MV)に飽和が生じたときの飽和時間の評価値をそれぞれ示す。

図2.5に遅れ系ルール群を、また図2.6に各ルールの前件部、後件部に対するメンバーシップ関数を示す。このルール群は7つのルールから成り、各ルールは2.3.2に示した遅れ系に対するパラメータ設定方針（すなわち、 ω_1 と交差周波数の比、および位相余裕を適切にすること）にもとづき決定した。

ルール1からルール3までは、特徴量OVをもとに、 ω_1 と交差周波数の比を保ちながら位相余裕を適切な値にするためのルールである。たとえば、ルール1は位相余裕が小さすぎる場合であり、Kpを下げることで位相余裕を増加させ、それとともにKiを上げることで ω_1 と交差周波数の比を保っている。

一方、ルール4からルール6までは、特徴量CIをもとに、 ω_1 と交差周波数の比が1/10になるようにKp、Kiを修正するルールである。たとえば、ルール4は、交差周波数に対し ω_1 が小さすぎる場合であり、Kiを下げることで改善しようとするものである。

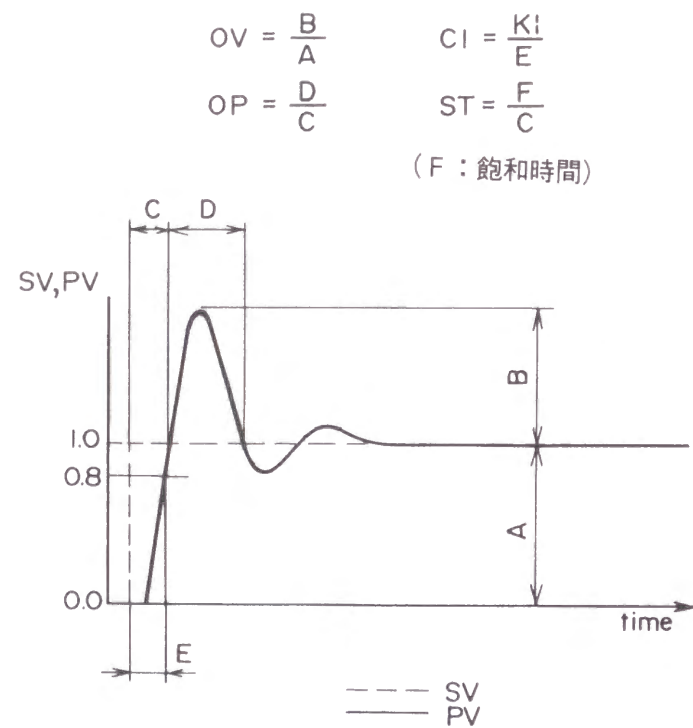


図2.4 特徴量

- | | | |
|-------|------------|------------------------|
| ルール 1 | OVが大きければ | Kpを大きく下げる
Kiを大きく上げる |
| ルール 2 | OVが中くらいならば | Kpは変化なし |
| ルール 3 | OVが小さければ | Kpを上げる
Kiを大きく下げる |
| ルール 4 | CIが大きければ | Kiを大きく下げる |
| ルール 5 | CIが中くらいならば | Kiは変化なし |
| ルール 6 | CIが小さければ | Kpを大きく上げる
Kiを大きく上げる |
| ルール 7 | STが大きければ | Kpを下げる
Kiをそのままに保つ |

図2.5 遅れ系ファジィルール群

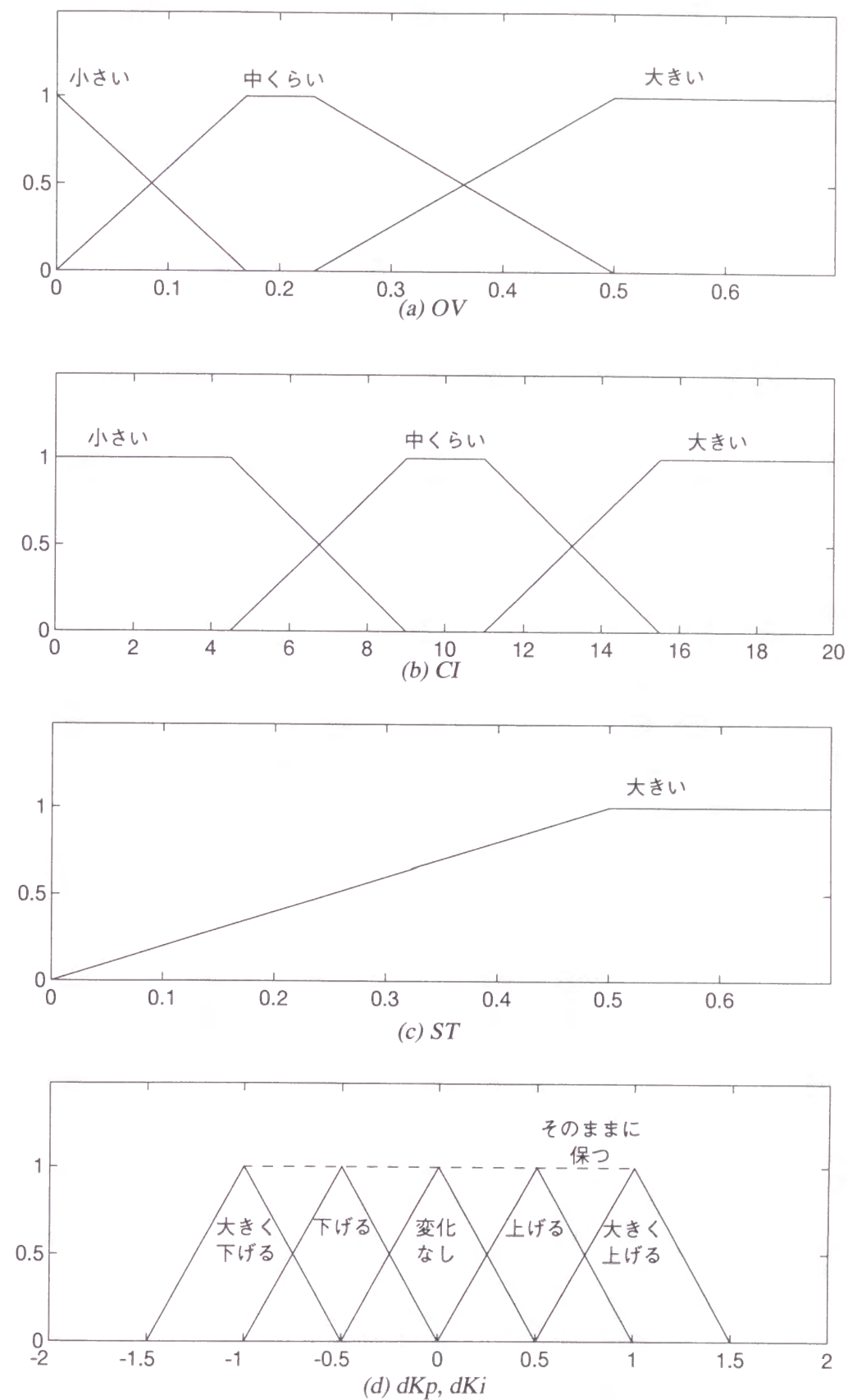


図2.6 遅れ系メンバシップ関数

また、ルール7は、飽和が生じた場合にはKpを下げKiをその値で保つというルールである。このルールを付加することにより、飽和のためにオーバシュート量が目標値に到達せずパラメータを上げ続けるような状況を避けることができる。

なお、このファジィ推論とは独立に、閉ループ系が不安定に近い場合の緊急時の対策として、例えば「OVが1.9以上の場合Kpを1/2にし、Kiを2倍にする」といったパラメータ修正を行っている。

また、図2.6のメンバシップ関数において、Kiの後件部の”そのままに保つ”は、通常のファジィ制御のメンバシップ関数と比較して特徴のある形状をしているが、飽和対策のルール7によりKiの変化を小さくするためのものである。

以上のファジィルール、メンバシップ関数によりファジィ推論の出力として、PIパラメータの変化率dKp, dKiがMIN-MAX-重心法で決定される。k回目のPIパラメータの修正は、dKp, dKiにより次式のように計算する。

$$Kp(k+1) = 2^{dKp} Kp(k) \quad (2.4)$$

$$Ki(k+1) = 2^{dKi} Ki(k) \quad (2.5)$$

また、安全性を考慮して、dKp, dKiの値はメンバシップ関数に示したように-1から1の間（すなわち、Kp, Kiの変化が1/2倍から2倍）とした。

図2.5, 図2.6に示した遅れ系ルール群、メンバシップ関数と同様に、中間系ルール群、むだ時間系ルール群、および、それぞれに対応するメンバシップ関数が用意されている。図2.7から図2.10に、それぞれ中間系ルール群、むだ時間系ルール群、中間系メンバシップ関数、むだ時間系メンバシップ関数を示す。ルール数は中間系ルール群が9ルール、むだ時間系ルール群が7ルールである。

2.3.5 オートチューニング手順

チューニングの手順を以下に示す。

ステップ1 Kp, Kiの初期値を閉ループ系が安定になる範囲で決定する。

ステップ2 ステップ応答中の制御対象への入出力（MV, PV）により制御対象のパラメータLとTを同定し、L/Tの値により使用するファジィルール群を選択する。

ステップ3 ステップ応答中の閉ループ系の入出力（SV, PV）より特徴量を抽出する。

ステップ4 ステップ応答終了後、選択したファジィルール群を用いて、特徴量をもとにしたファジィ推論を行い、PIパラメータを修正する。

ステップ5 ステップ4におけるPIパラメータの修正量が十分小さくなるまで、閉ループ系への次のステップ入力を待ち、ステップ3, ステップ4を繰り返す。

ルール 1	OVが大きければ	Kpを下げる Kiを上げる
ルール 2	OVが中くらいならば	Kpは変化なし Kiを変化なし
ルール 3	OVが小さければ	Kpを上げる Kiを下げる
ルール 4	OPが非常に大きければ	Kpを大きく上げる Kiを大きく上げる
ルール 5	OPが大きければ	Kpを上げる Kiを上げる
ルール 6	OPが小さく OVが小さくなければ	Kpを下げる Kiを下げる
ルール 7	OPが非常に小さく OVが小さくなければ	Kpを大きく下げる Kiを大きく下げる
ルール 8	CIが小さければ	Kpを上げる Kiを上げる
ルール 9	STが大きければ	Kpを下げる Kiをそのままに保つ

図2.7 中間系ファジィルール群

ルール 1	OVが大きければ	Kiを上げる
ルール 2	OVが中くらいならば	Kiは変化なし
ルール 3	OVが小さければ	Kiを下げる
ルール 4	CIが大きければ	Kpを大きく下げる Kiを下げる
ルール 5	CIが中くらいならば	Kpは変化なし
ルール 6	CIが小さければ	Kpを大きく上げる Kiを上げる
ルール 7	STが大きければ	Kpを下げる Kiをそのままに保つ

図2.8 むだ時間系ファジィルール群

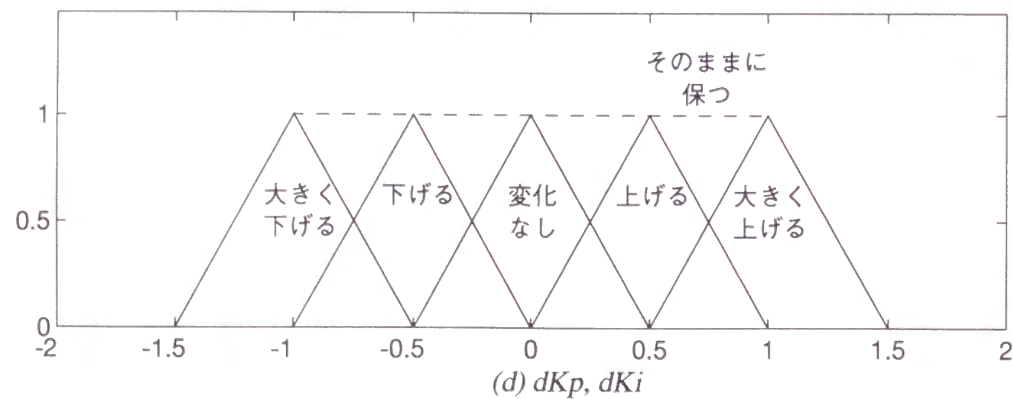
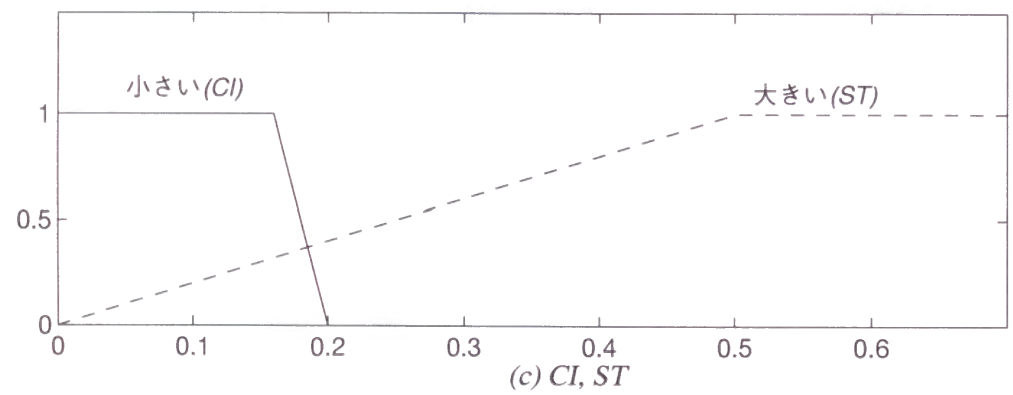
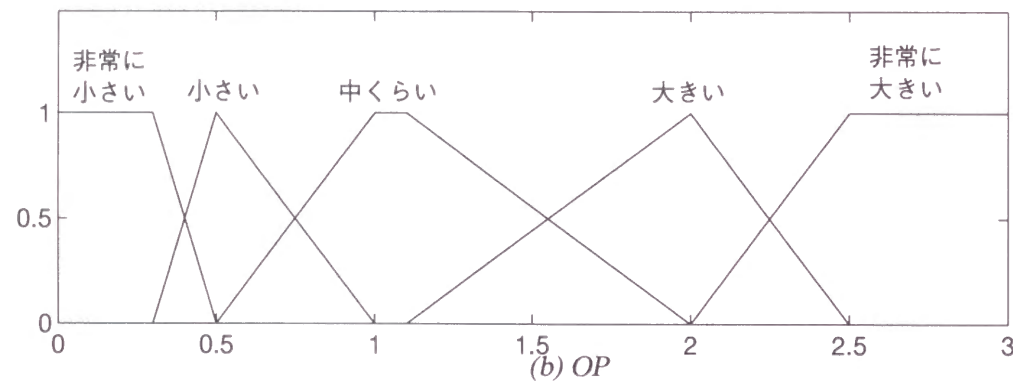
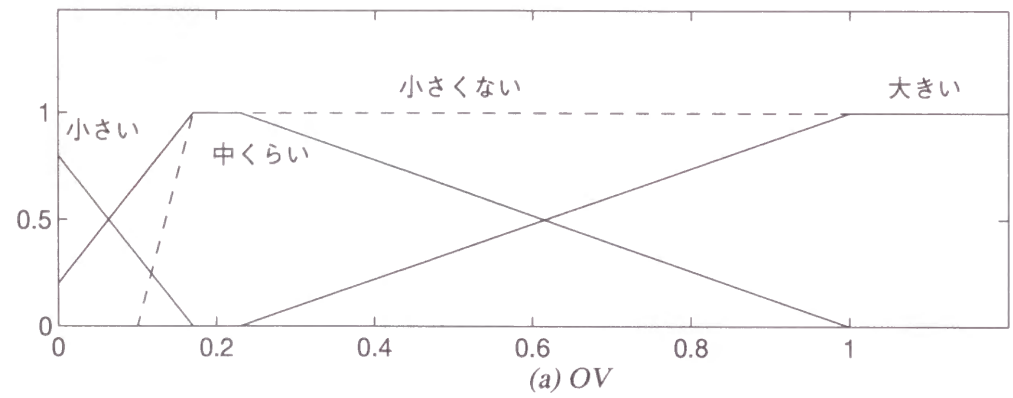


図2.9 中間系メンバシップ関数

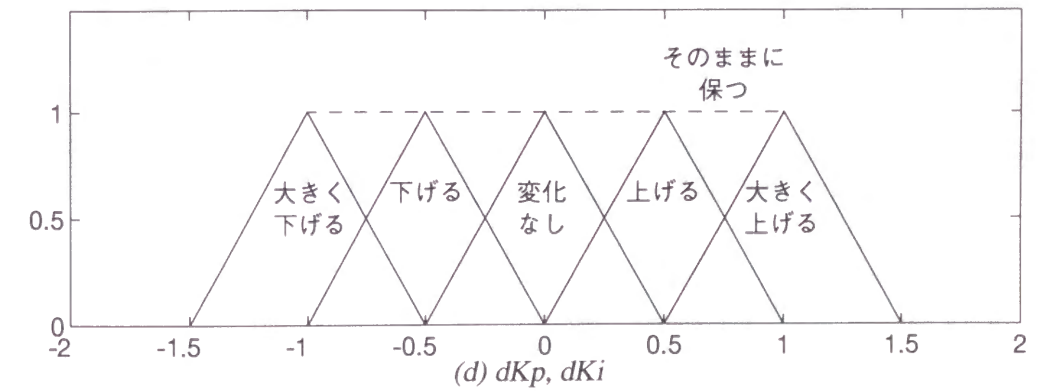
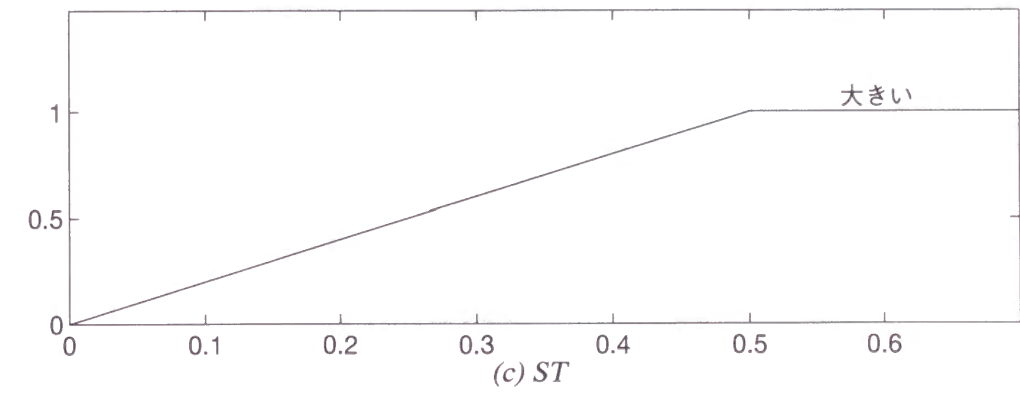
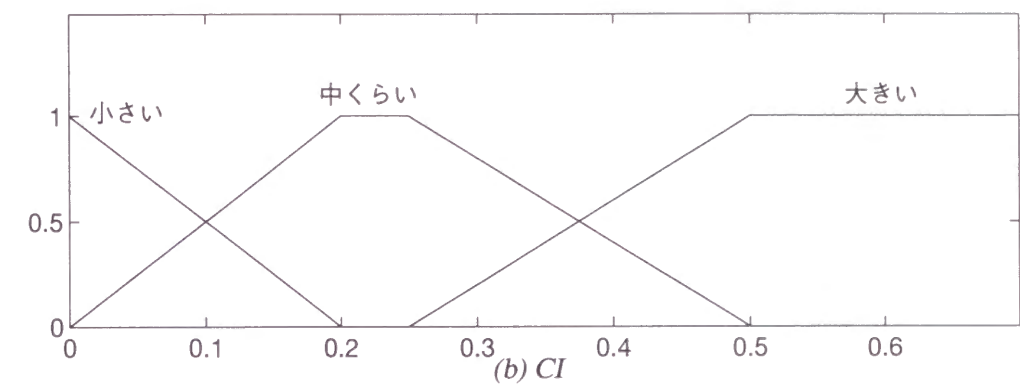
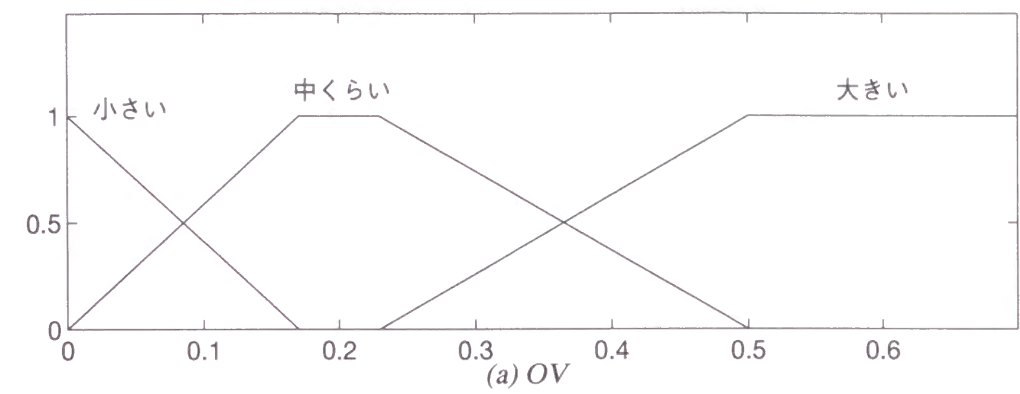


図2.10 むだ時間系メンバシップ関数

2. 4 シミュレーション結果

図2.11は、前章で示したルール、メンバシップ関数、チューニング手順によりシミュレーションを行った結果であり、SV、PVの時系列データを示している。1回のステップ応答終了ごとにPIパラメータの修正が行なわれている。図2.11において、(a)、(b)、(c)は、制御対象がそれぞれ遅れ系、中間系、むだ時間系の場合であり、それぞれに対して遅れ系ルール群、中間系ルール群、むだ時間系ルール群が選択されている。図より、最終的に目標仕様を満たす良好なチューニングが実現できていることがわかる。このことより、前節で提案したアルゴリズムは広い範囲の制御対象に有効であることが確認できた。

オートチューニングアルゴリズムにおいては、チューニングの安定性、すなわちチューニングの過程において用いられるパラメータが閉ループ系を不安定にしないことを確認することが望まれる。しかし、従来のファジィオートチューニング法ではこれを議論したものはなかった。そこで、この安定性の確認のために、PIパラメータ遷移図を提案する。このPIパラメータ遷移図は、1回のステップ応答により修正されるPIパラメータの変化の様子をPIパラメータ平面上に三角形で示したものである。なお、閉ループ系が不安定になるPIパラメータ平面上の領域には、三角形を描かない。このPIパラメータ遷移図により、チューニングの安定性が視覚的に確認できる。

図2.12はPIパラメータ遷移図の一例であり、図2.11(a)の制御対象に対するものである。図2.12によると、PIパラメータの変化は不安定な領域に入ることがなく、次第に図中に示した円に近づいていくことがわかる。図2.12の円付近で示されるPIパラメータは、図2.11(a)の最後のステップ応答を実現する適切なものである。したがって、この制御対象に対するチューニングにおいては、初期値として安定なPIパラメータを選択すれば、数回のステップ応答の後望ましいPIパラメータが得られることが確認できた。

図2.13、図2.14は、それぞれ図2.11(b)、図2.11(c)の制御対象に対するPIパラメータ遷移図である。この他にも、種々のL/Tの比を持つ制御対象に対してPIパラメータ遷移図を描いた結果、図2.12と同様にチューニングの安定性を確認できるものが得られた。確認した制御対象は、一次遅れ+むだ時間系の特性をほぼ網羅するように選択した。したがって、一次遅れ+むだ時間系で示される範囲の制御対象に対しては、提案したアルゴリズムにより、安定なチューニングが可能であることが確認できたといえる。

なお、PIパラメータ遷移図はルールやメンバシップ関数の決定に対しても有力なツールとなる。すなわち、PIパラメータ遷移図によってチューニングが不安定であることを確認した場合には、その原因となっているルールを容易に発見できるため、そのルールあるいは対応するメンバシップ関数を修正すれば良い。

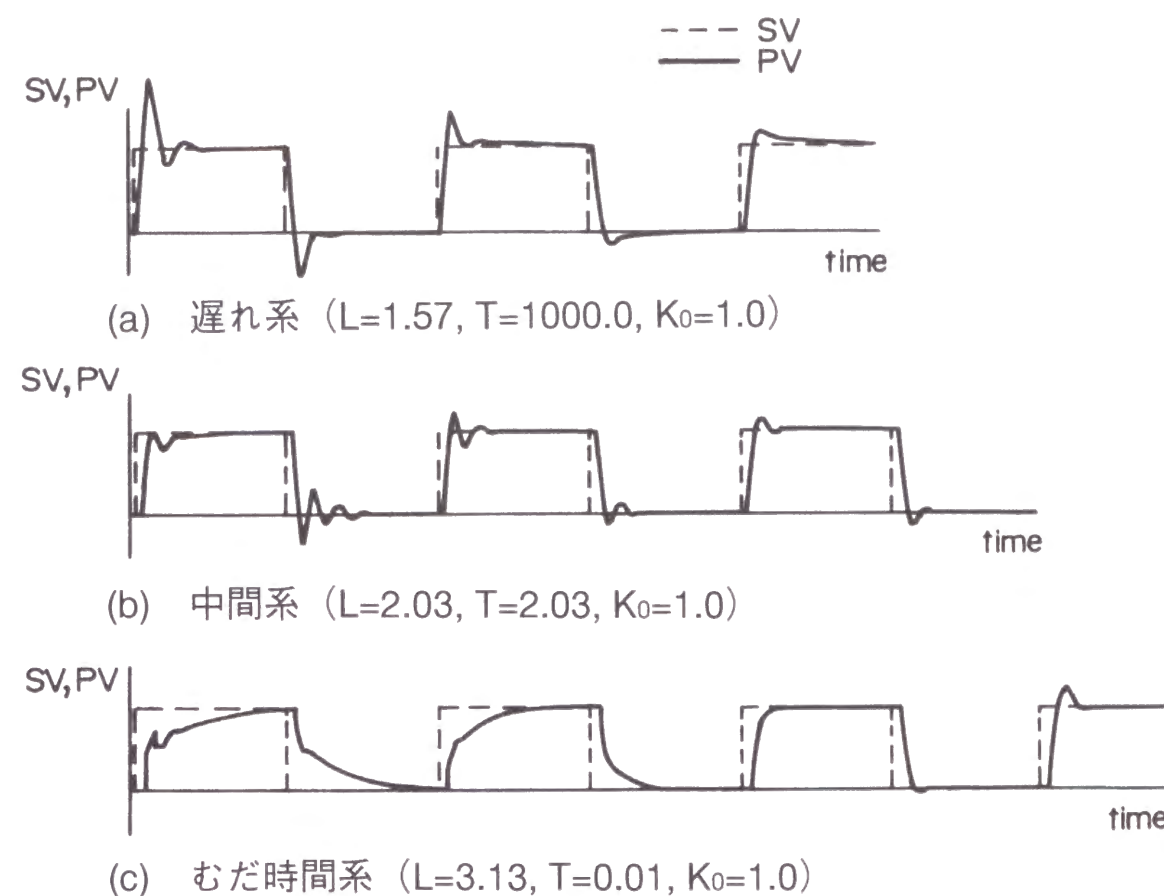


図2.11 一次遅れ+むだ時間系のシミュレーション結果

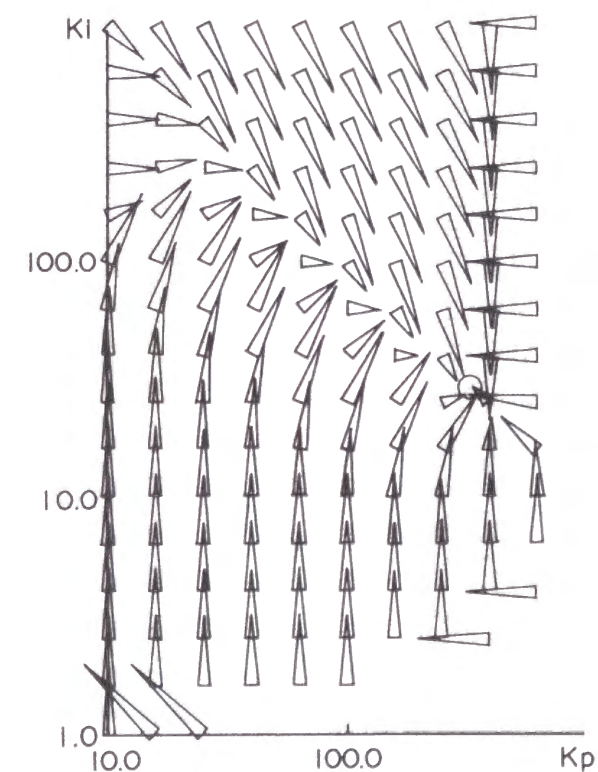


図2.12 PIパラメータ遷移図 (L=1.57, T=1000.0, K0=1.0)

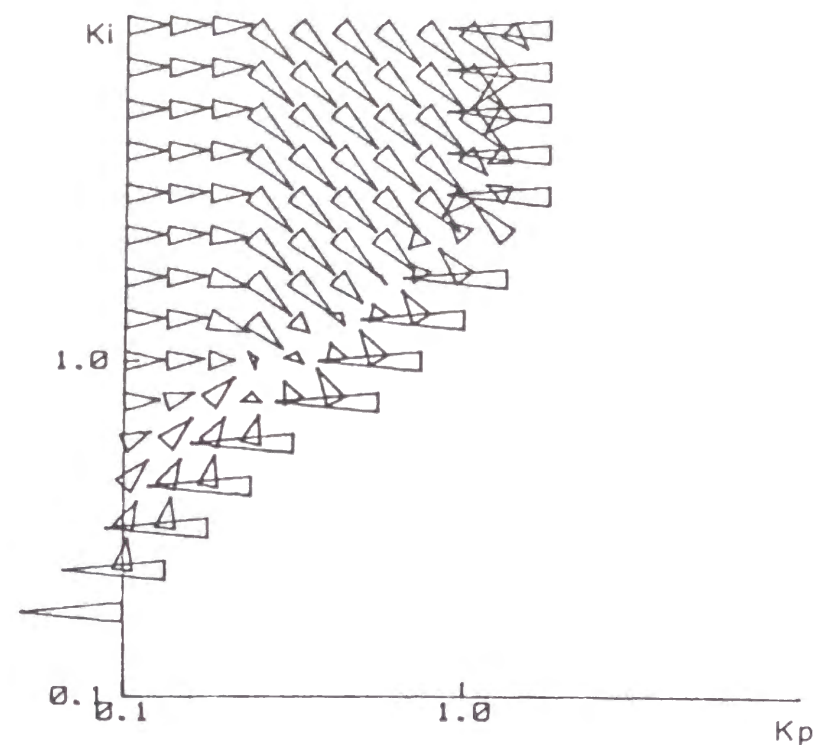


図2.13 PIパラメータ遷移図 ($L=2.03$, $T=2.03$, $K_0=1.0$)

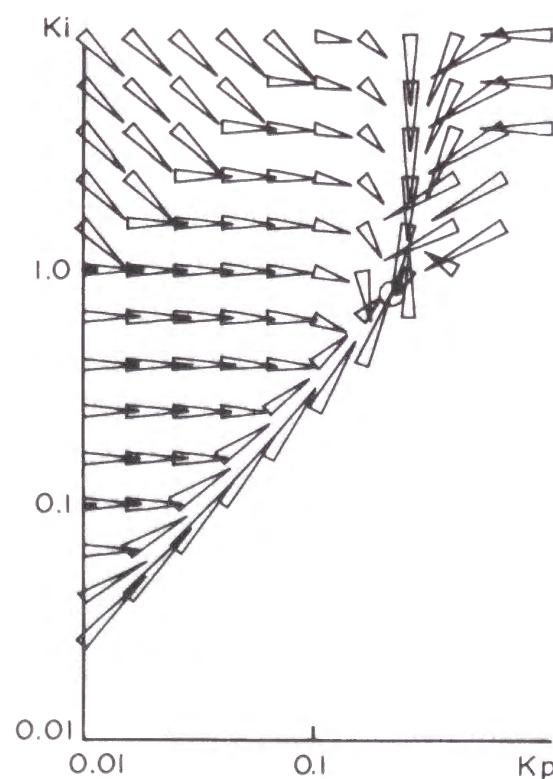


図2.14 PIパラメータ遷移図 ($L=3.13$, $T=0.01$, $K_0=1.0$)

2. 5 テストプラントによる実験

本方式の実プラントにおける有効性を確認するため、乾燥炉を模擬したテストプラントを試作し、2. 3に示したアルゴリズムにより実験を行なった。図2.15にテストプラントの概略構成図を、図2.16にその外観を示す。今回の実験は、ヒータに流す電流を変化させることにより、銅管内の空気温度を制御する。なお、この装置では、電流の指令値MVは、規格化された無次元量で、 -10.0 , $+10.0$ がそれぞれヒータに流れる電流 $0.0A$, $2.5A$ に対応し、 ± 10.0 で飽和する。提案したアルゴリズムが様々な特性の制御対象に有効であることを確認するため、制御対象のむだ時間を仮想的にコントローラ上で付加できるようにした。実験は、付加むだ時間 0 秒、 20 秒、 300 秒で行った。

図2.17に付加むだ時間 0 秒の場合の実験結果を示す。この図は、MV, SV, PVの時系列データであり、オートチューニングによるステップ応答の修正の様子を示している。この実験では、1回目のステップ応答から求めた同定値は、 $L=10.0$, $T=66.1$, $K_0=2.05$ で、 $L/T=0.151$ となったため、中間系ルール群が選択されている。ここで得られたむだ時間の同定値 10.0 秒は、プラント自体が持つむだ時間の大きさと考えられる。図2.17によると、ステップ応答を繰り返すことにより、立ち上がり時間が徐々に短縮され、良好な応答になっていくが、次第にMVに飽和が生じ、目標仕様のオーバーシュート 20% を満足せずに、チューニングが終了している。これは、中間系ルール群の飽和に関するルール（図2.5のルール7に対応）が働き、目標仕様の妥協点で収束したためである。

図2.18に付加むだ時間 20 秒の場合の実験結果を示す。この場合も、同定値は $L=36.0$, $T=60.6$, $K_0=2.31$ で $L/T=1.68$ となり、中間系ルールが選択されている。図2.18においては、PIパラメータの初期値では応答が振動的であったが、最終的には目標仕様を満たす応答が得られていることがわかる。

図2.19に、図2.18の実験時に得られた制御対象の同定パラメータを用いてシミュレーションを行った場合の結果を示す。図2.18の実験の場合と同じような経過を経て、望ましい応答に収束していることがわかる。ただし、最終的に得られたPIパラメータは実験結果とそれぞれ 50% 程度の差があった。これは、閉ループ系のステップ応答を用いた同定結果が正確でなかったためと考えられるが、図2.18の実験結果は、本手法では大まかな同定結果で望ましいチューニングが可能であることを示している。

図2.20は、付加むだ時間 20 秒の場合のチューニング実験結果におけるPIパラメータの変化の様子をPIパラメータ平面上に表わしたものである。図中、3本の線は、それぞれ異なる初期値からチューニングを開始した場合であり、白丸がチューニング開始点、黒丸が終了点を表わす。初期値にかかわらず、適切なPIパラメータに収束していく様子が確認できる。

図2.21は、付加むだ時間 300 秒の場合の実験に対し、図2.20と同様の図を描いたものである。この制御対象に対しては、むだ時間系ルール群が選択されている。このようなむだ時間の大きな制御対象においても、むだ時間系ルール群を用いることにより、初期値の影響を受けずに、良好なチューニングが達成できている。

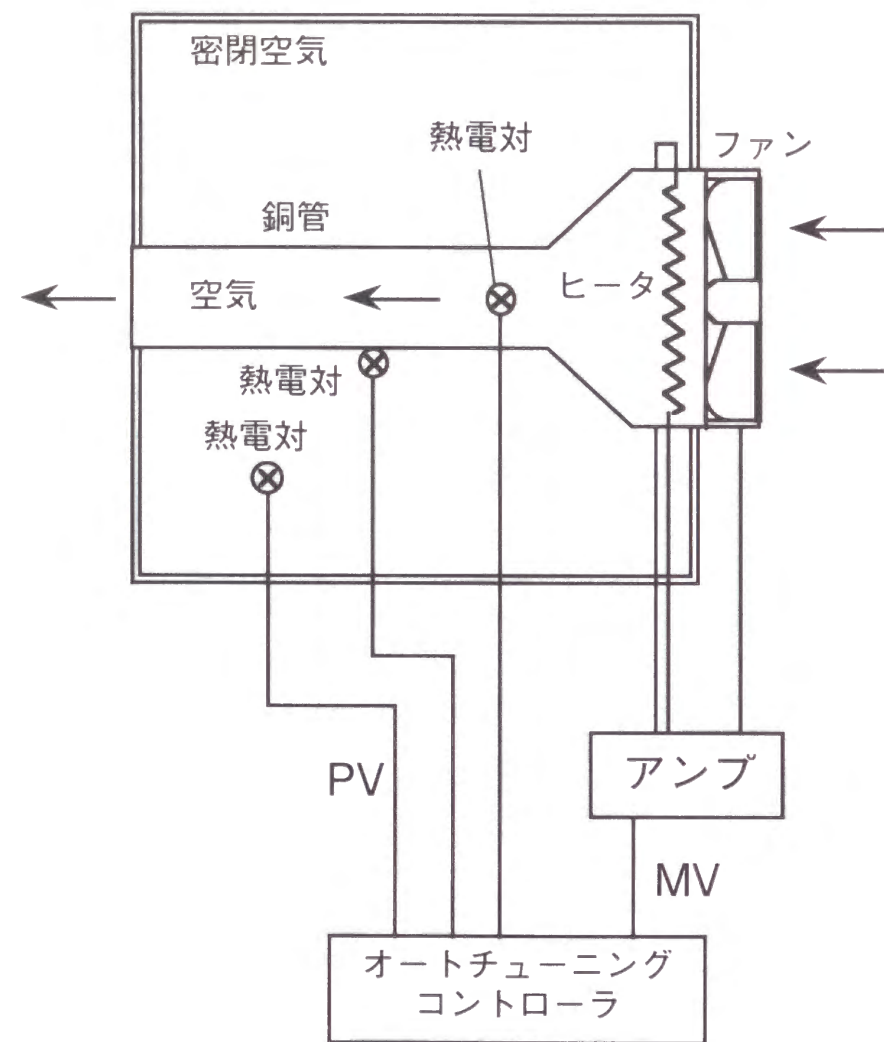


図2.15 テストプラントの構成

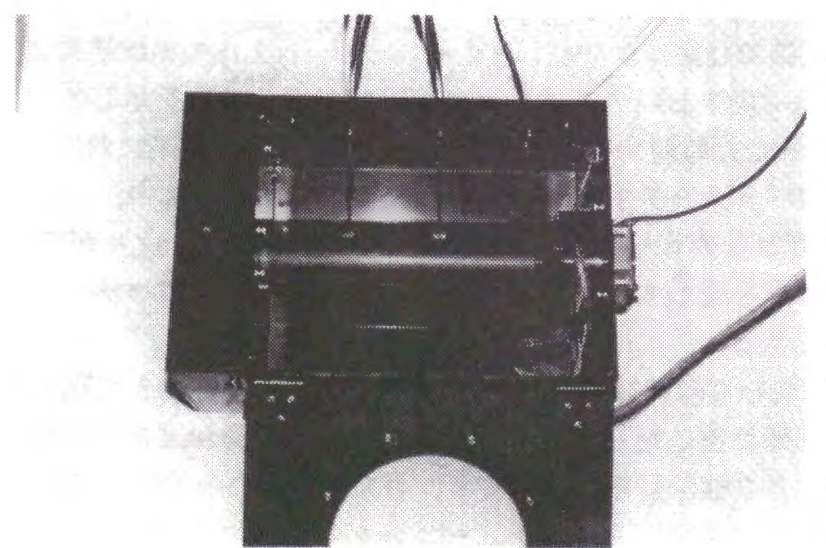


図2.16 テストプラント

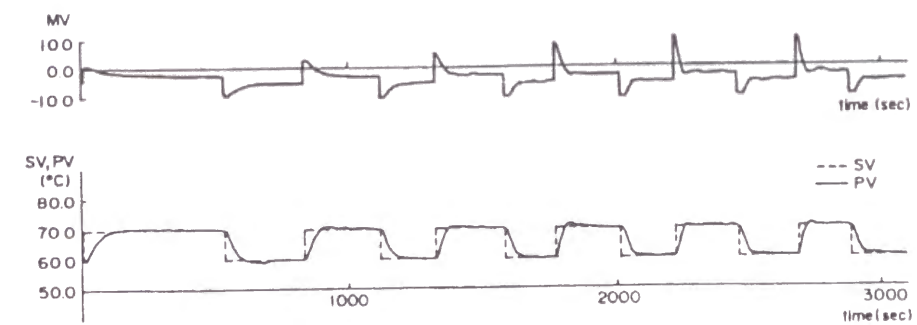


図2.17 実験結果（付加むだ時間なし）

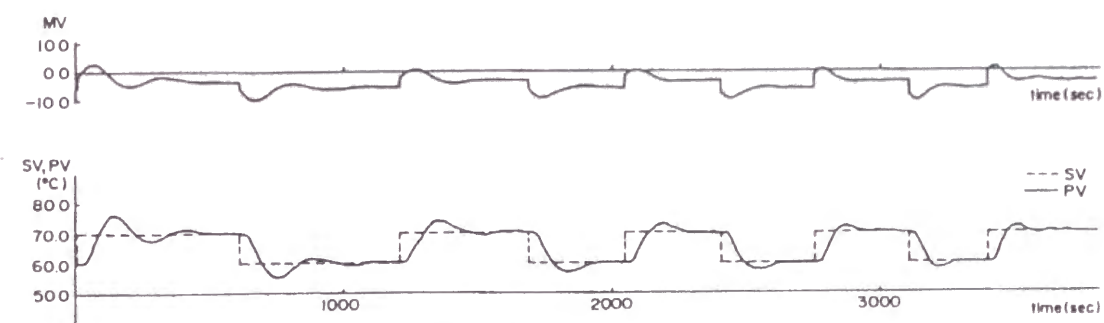


図2.18 実験結果（付加むだ時間20秒）

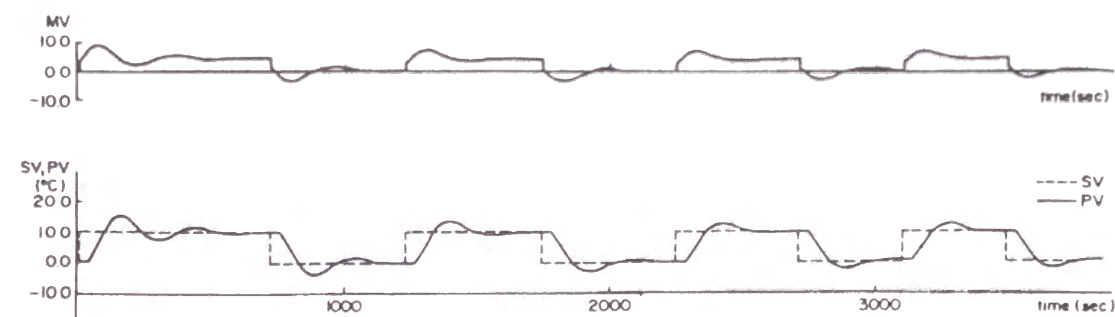


図2.19 シミュレーション結果（ $L=36.0$, $T=60.6$, $K_0=2.31$ ）

2. 6 おわりに

本章では、適用できる制御対象の範囲が広いファジオートチューニング方式を提案した。従来のファジオートチューニングに、同定モデルによる分類を付加することにより、特徴量にもとづく間接調整法（表1.1の領域1）の適用可能範囲を、明確にし、拡大した。そして、提案した方式を一次遅れ+むだ時間系に対して適用し、シミュレーション、および実験により、その有効性を確認した。また、チューニングの安定性についてはパラメータ遷移図により視覚的に確認している。

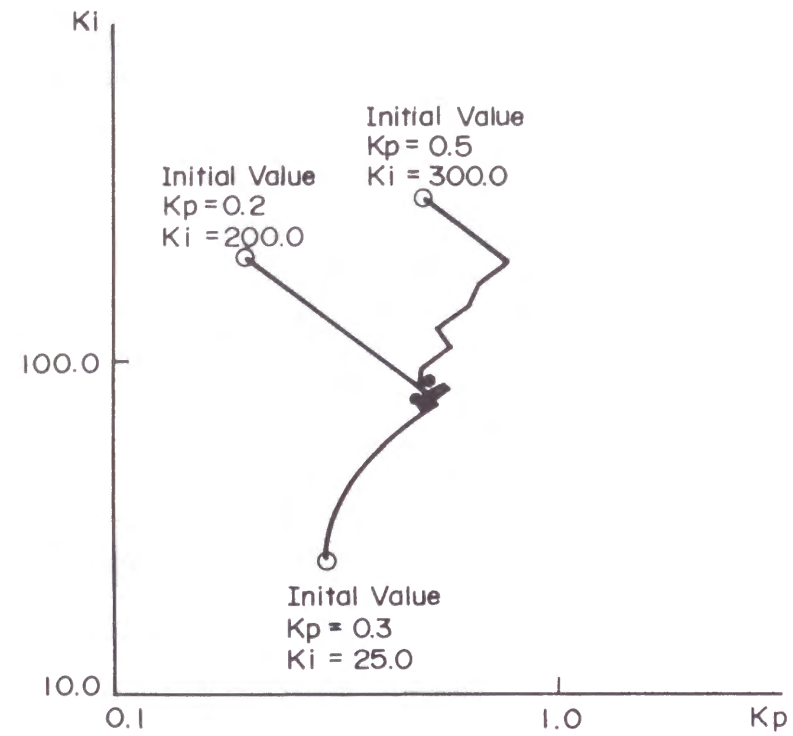


図2.20 PIパラメータの変化（付加むだ時間20秒）

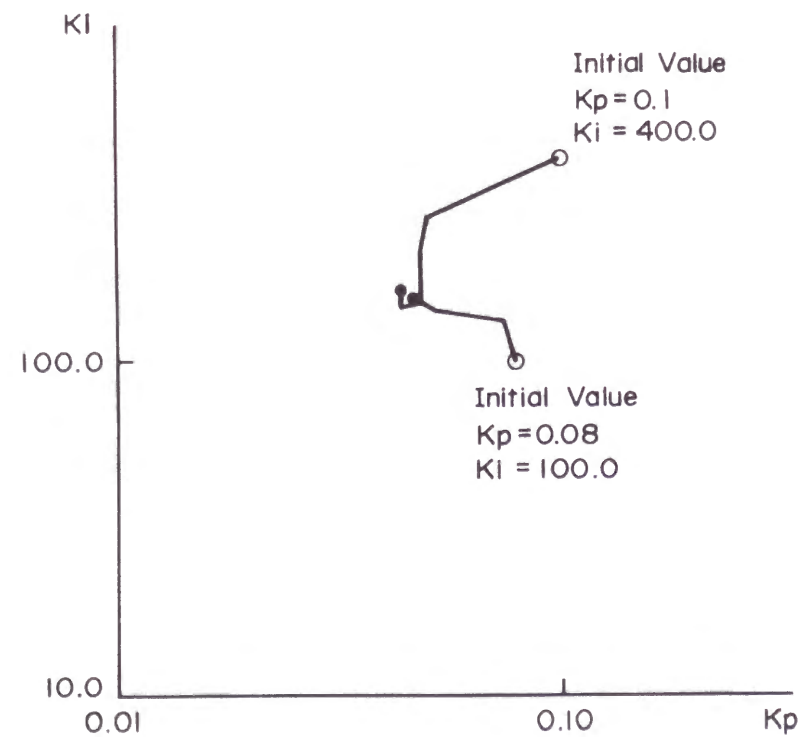


図2.21 PIパラメータの変化（付加むだ時間300秒）

3. ファジィ推論による 同定を用いた オートチューニング

3. 1 はじめに

ダイナミカルシステムを対象とするコントローラの設計に際しては制御対象の動特性を把握することが必要であり，その動特性の表現として伝達関数で示された制御対象モデルを用いることが有効である．この制御対象モデルのパラメータ同定法としては，最小2乗法などのシステム同定理論[40]にもとづく手法が，理論的で一般性のあるものとして通常用いられる．しかし，この手法はコントローラの設計とは独立な同定アルゴリズムであり最終目標である閉ループ系の応答による同定結果の修正が困難であること，正確な同定値を得るために同定用信号の印加が必要となる場合が多いこと，などの性質を持つ．これらの性質は応用分野によっては実用上問題となる場合があり，オートチューニングにおいても同定用信号の印加は望ましくない場合が多い．

そこで，本章では，制御対象モデルのパラメータ同定の新しい考え方として，ファジィ推論による同定法を提案し，そのオートチューニングへの応用について考える．この同定法は，閉ループ系の応答波形から抽出した特徴量をもとにパラメータ同定を行う手法であり，特別な同定用信号を必要としないこと，コントローラの設計と結びつけやすく閉ループ系の応答を確認しながら同定が行えることなどに特長がある．また，オートチューニングへの応用は，この同定法と一般的な制御系設計法を結びつけたものであり，特徴量データによる間接調整（表1.1の領域3）に対応するオートチューニングを実現したものといえる．以下では，ファジィ推論による同定法およびそれを用いたオートチューニング法の構成について述べた後，前章で取り上げた一次遅れ＋むだ時間特性を持つ制御対象のプラント制御系，および機構を駆動するモータ位置制御系（サーボ系）の2つの具体例に対して提案した方式を適用し，その有効性を示す．

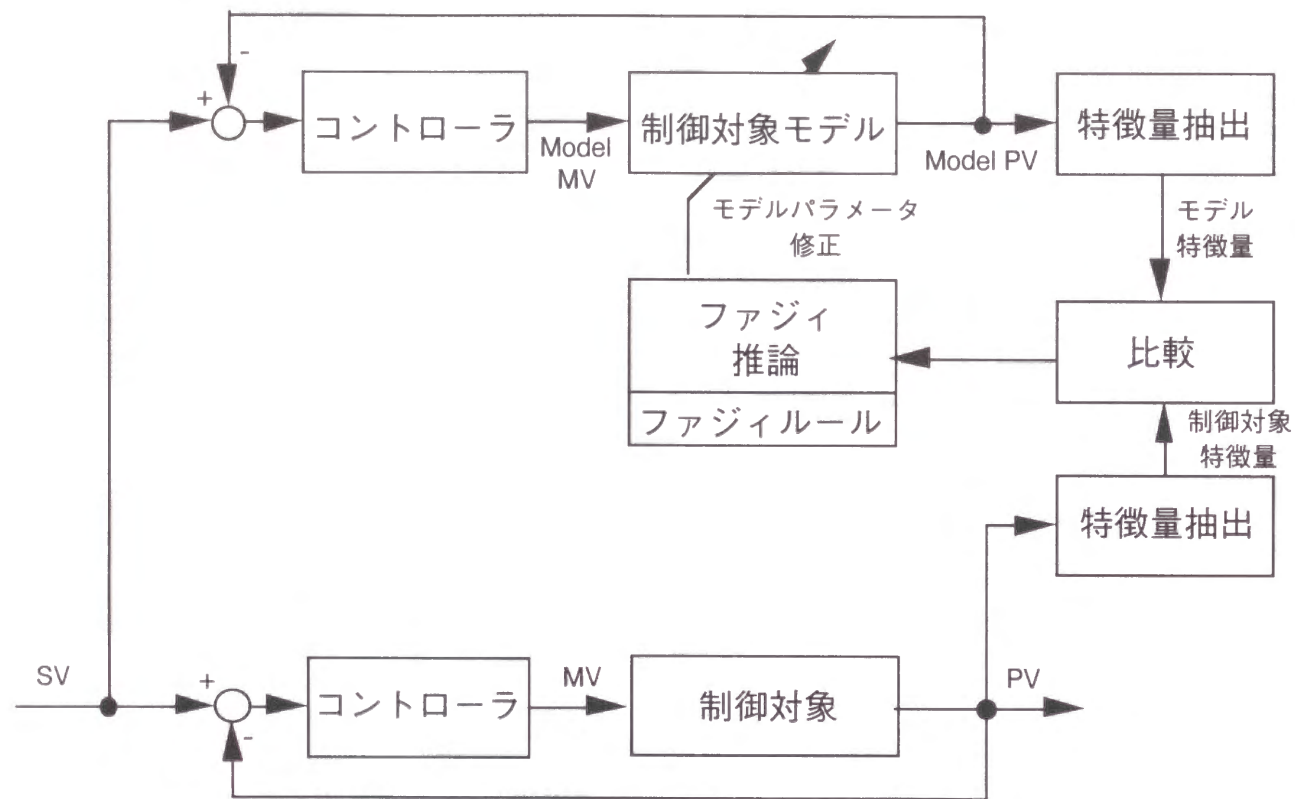


図3.1 ファジィ推論を用いた制御対象の同定法

3.2 ファジィ推論を用いた制御対象の同定

図3.1が、提案する同定法のシステムの構成図である。この方式は、2つの閉ループ系を持ち、一方は実際の制御対象を、他方は計算機上の制御対象モデルを、それぞれ同じ特性を持つコントローラで制御する構造になっている。言い換えると、この方式は、実際の制御対象を含む実システムと、制御対象モデルを制御するシミュレータを持つ。そして、2つの閉ループ系（実システムとシミュレータ）の応答波形の特徴量の比較値から、ファジィ推論により制御対象モデルの修正（シミュレータの応答が実システムの応答に一致するような修正）を行う。特徴量とは、例えば、ステップ応答時のオーバーシュート量、立ち上がり時間などであり、ファジィ推論はこの特徴量の比較値とモデル修正量との関係を表現するために用いられている。この特徴量やファジィルールは、制御対象モデルや各パラメータの特性などに応じて適切なものに決定する必要がある。

この同定法の概略手順は次のようになる。まず、制御対象モデルのパラメータの初期値を決める。そして、ある入力（SV）の変化に対して得られた2つの閉ループ系の出力（PV, Model PV）からそれぞれ特徴量を抽出し、その値を比較する。2つの閉ループは、制御対象と制御対象モデルのみ異なるので、得られた特徴量の差異は制御対象とそのモデルとの差異に起因するものである。そこで、特徴量の比較値から制御対象モデルのパラメータのずれを推定するファジィ推論を行い、モデルパラメータを修正する。以上の手順を繰り返し、特徴量の差が無くなった時点で、同定値が得られたと判断する。

本方式は同定法として次のような特長がある。

- (1) 通常の指令としての入力変化に対する閉ループ系の応答から特徴量を抽出するため、同定のための特別な入力変化を必要とせずに同定が可能になる。
- (2) 特徴量の抽出方法を工夫することにより、ノイズの影響を受けにくくできる。また、パラメータの修正結果を確認しながら繰り返すため、一時的なノイズにも強い。

3.3 オートチューニングへの応用

提案した同定法を一般的な制御系設計法に結びつけることにより、同定用信号の印加を必要とせず閉ループ系の応答（特徴量）を確認しながらパラメータ設定が行えるオートチューニング方式が実現できる。

これまで提案されているオートチューニング方式にも、特徴量をもとにファジィ推論により直接コントローラパラメータを変更していくものがある[12-16]。しかし、これらの方式は、制御対象モデルを陽に利用せずに特徴量とパラメータ修正量の関係を直接ファジィルールで表現しようとしているため、一般性のあるファジィルールの決定が困難で、チューニング結果が制御対象の特性に影響されやすく、ステップ入力などの特定の入力変化が要求されるという問題がある。前章で述べた方式は、ファジィ推論を行う前段階で制御対象の特性をある範囲に限定することでファジィ推論によるオートチューニングの一般性の向上を図ったが、特定の入力変化が必要という問題は残されている。

提案した同定法を用いたオートチューニング方式を、図3.2のブロック図に示す。これは、提案した同定法にコントローラを修正するためのコントローラ設計部を追加したものである。すなわち、ファジィ推論により制御対象モデルのパラメータが修正された場合、コントローラ設計部によりその時点での制御対象モデルに最適なコントローラが決定され、2つの閉ループのコントローラが修正される。最終的に、制御対象の同定の終了時に、制御対象に適したコントローラが得られる。

提案するオートチューニングの手順を以下に示す。

ステップ1 制御対象モデルの構造とパラメータ初期値を決定する。

ステップ2 コントローラ設計部により制御対象モデルに最適なコントローラを決定する。

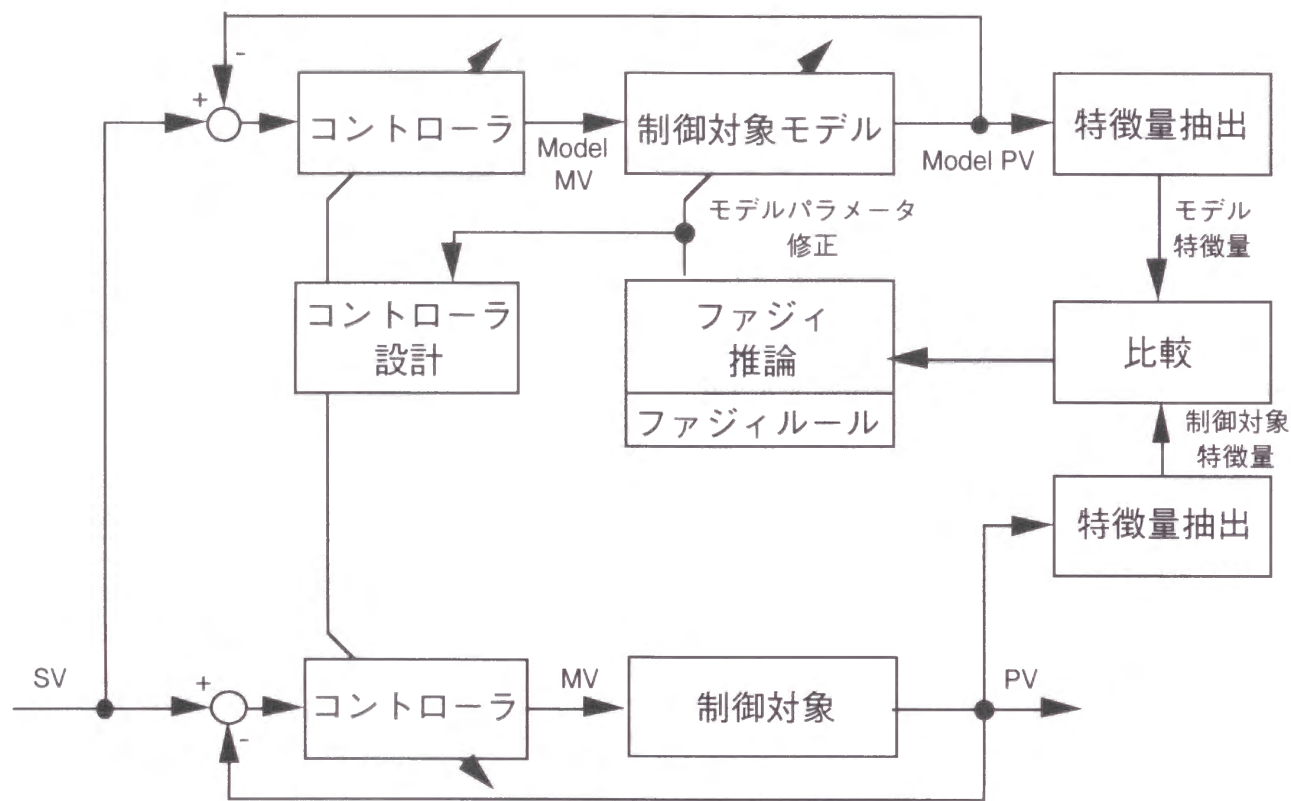


図3.2 ファジィ推論を用いた同定法によるオートチューニング

ステップ3 2つの閉ループ系への入力（SV）の変動時に、特徴量をそれぞれの出力（PV）から抽出する。

ステップ4 特徴量を比較し、ほぼ一致していればオートチューニングを終える。一致していなければ、ファジィ推論により制御対象のモデルパラメータを修正する。

ステップ5 ステップ2へ戻る。

図3.2の制御対象モデルを含む閉ループでは、その制御対象モデルに最適なコントローラが常に用いられるためその閉ループ系の応答は望ましいものになり、ここから得られた特徴量は、実際の制御対象の応答の特徴量の目標基準として適切なものである。従って、このオートチューニング方式は、制御対象モデルのパラメータ同定結果とコントローラの設計結果を統合して評価し、閉ループ系の応答を目標基準に近づけようとするものであるといえる。

この方式は、従来の特徴量をもとに直接コントローラを修正するファジィオートチューニング手法[12-16]に比べ、オートチューニング手法として以下のような特長を持つ。

- (1) コントローラ設計部において制御理論にもとづいた一般的な制御系設計法を使用できるので、特性の大きく異なる制御対象にも適用できる。
- (2) 制御対象と制御対象モデルの応答の比較によりチューニングを行うので、チューニング手順の繰り返しにおいて毎回厳密に同じ入力変化が必要ではない。次節より、提案した方式について、2つの具体例を示しその有効性を示す。

3. 4 プラント制御系におけるオートチューニング

3.4.1 一次遅れ+むだ時間系への適用

一次遅れ+むだ時間で伝達関数が示される制御対象をPIあるいはPIDコントローラで制御する場合のPIDパラメータの決定に、前節で示したオートチューニング方式を適用し、シミュレーションによってその有効性を示す。この制御対象は、2章で用いたものと同じで、プラント制御で一般的な特性として用いられるものである。

コントローラの伝達関数 $C(s)$ は次式で表わされるとする。

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{K_i s} + K_d s \right) \quad (3.1)$$

ただし、 K_p は比例パラメータ、 K_i は積分時定数、 K_d は微分パラメータを示し、この3つがオートチューニングで決定するPIDパラメータである。また、PI制御を行う場合には、 $K_d=0$ である。制御対象の伝達関数 $P(s)$ は、2章と同様に次式で表わされるとする。

$$P(s) = \frac{K_0 e^{-Ls}}{1 + Ts} \quad (3.2)$$

ただし、 L はむだ時間の大きさ、 T は一次遅れ時定数、 K_0 はプラントゲインを示す。

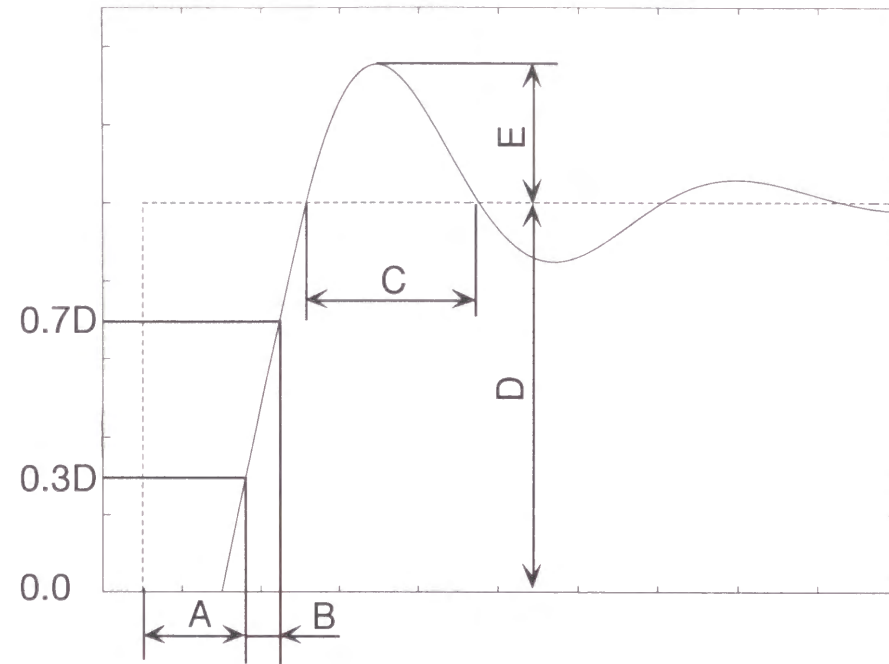
ここでは、制御対象モデルの伝達関数 $P_m(s)$ を制御対象と同じ一次遅れ+むだ時間系の構造を持つとした。

$$P_m(s) = \frac{K_{0m} e^{-L_m s}}{1 + T_m s} \quad (3.3)$$

ただし、添字 m は制御対象モデルのパラメータであることを示す。 L_m 、 T_m 、 K_{0m} がファジィ推論によって修正される。

ここでは、特徴量、およびその比較値として図3.3に示すものを用いた。図3.3の各特徴量の式において、 $A \sim E$ の添え字 p および m は、それぞれ制御対象および制御対象モデルの応答に対する検出値を示す。特徴量の比較値 cmp_ovr 、 cmp_rise 、 cmp_r30 、 cmp_rng がファジィ推論の入力となる。

ファジィ推論のためのルールを図3.4に、メンバシップ関数を図3.5に示す。これらは、制御における一般的な知識から得られる定性的な関係をもとに決定した。ファジィ推論方式としては一般的なMIN-MAX-重心法を用いた。



特徴量：

$$p_ovr = \frac{E_p}{D_p}, p_rise = B_p, p_r30 = A_p, p_rng = C_p$$

$$m_ovr = \frac{E_m}{D_m}, m_rise = B_m, m_r30 = A_m, m_rng = C_m$$

比較値：

$$cmp_ovr = p_ovr - m_ovr, cmp_rise = \frac{p_rise}{m_rise},$$

$$cmp_r30 = \frac{p_r30}{m_r30}, cmp_rng = \frac{p_rng - m_rng}{m_r30 + m_rise}$$

図3.3 特徴量とその比較値

K回目の制御対象モデルパラメータの修正は、ファジィ推論の結果である $dL(K)$, $dT(K)$, $dK(K)$ を用いて、次式のように決定する。

$$L_m(k+1) = 2^{dL(k)} L_m(k) \quad (3.4)$$

$$T_m(k+1) = 2^{dT(k)} T_m(k) \quad (3.5)$$

$$K_{0m}(k+1) = 2^{dK(k)} K_{0m}(k) \quad (3.6)$$

- | | | |
|--------|-----------------------------------|--|
| ルール1： | cmp_ovrが
cmp_riseが | not_largeであり,
largeならば,
dKは negative. |
| ルール2： | cmp_ovrが
cmp_riseが | not_largeであり,
middleならば,
dKは zero. |
| ルール3： | cmp_ovrが
cmp_riseが | not_largeであり,
smallならば,
dKは positive. |
| ルール4： | cmp_ovrが | much_largeならば,
dLは positive
dTは negative
dKは positive. |
| ルール5： | cmp_r30が | largeならば,
dLは positive. |
| ルール6： | cmp_r30が | middleならば,
dLは zero. |
| ルール7： | cmp_r30が | smallならば,
dLは negative. |
| ルール8： | cmp_riseが
cmp_r30が
cmp_ovrが | s_middleであり,
s_middleであり,
largeならば,
dTは positive
dKは positive. |
| ルール9： | cmp_riseが
cmp_r30が
cmp_rngが | s_middleであり,
s_middleであり,
largeならば,
dTは positive. |
| ルール10： | cmp_riseが
cmp_r30が
cmp_rngが | s_middleであり,
s_middleであり,
middleならば,
dTは zero. |
| ルール11： | cmp_riseが
cmp_r30が
cmp_rngが | s_middleであり,
s_middleであり,
smallならば,
dTは negative. |

図3.4 同定のためのファジィルール（プラント制御系）

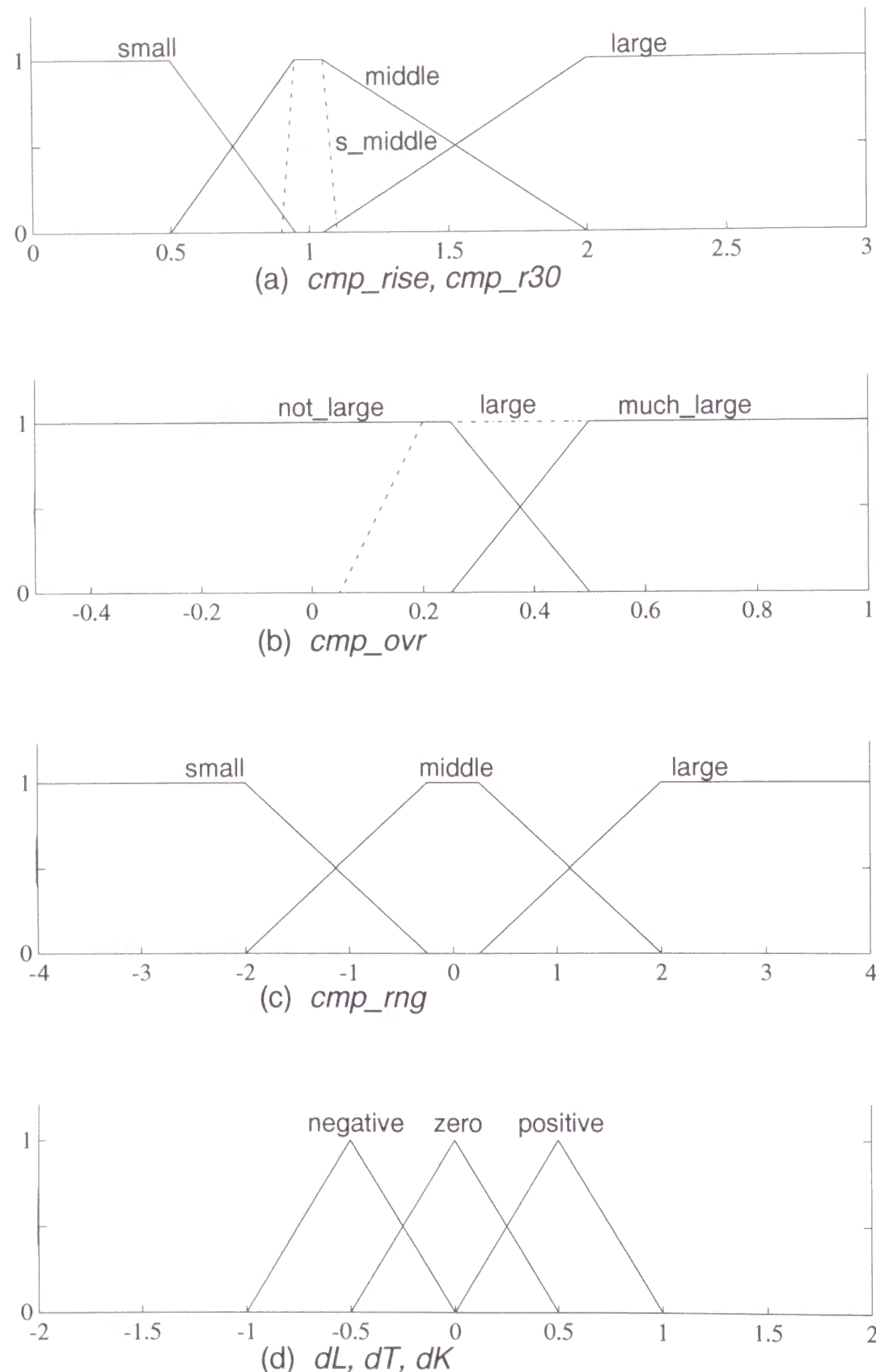


図3.5 メンバシップ関数（プラント制御系）

また、コントローラ設計法で用いられるPIパラメータの決定法には、部分的モデルマッチング法[39]を採用した。すなわち、 L_m 、 T_m 、 K_{om} が(3.4)～(3.6)式により修正されるごとに、部分的モデルマッチング法によりPIDパラメータを修正する。

3.4.2 シミュレーション結果

以上の準備のもとに、一次遅れ+むだ時間系に対するPI制御およびPID制御のオートチューニングのシミュレーションを行い、本方式の有効性を確認する。

図3.6にPI制御に対するシミュレーション結果を示す。PI制御は(3.1)式の K_d を0に固定している。図中、(a)(b)(c)はそれぞれ特性の大きく異なる制御対象に対する結果を示しており、実線は制御対象を含む閉ループ系の出力PV、点線はモデルを含む閉ループ系の出力Model PVを表わす。それぞれの制御対象に対し、制御対象の応答は、チューニング前にはモデルの応答と異なって望ましいものではなかったが、最終的には一致し目標仕様を満たすようになったことがわかる。

図3.6(b)で用いた制御対象に対し、様々な初期値からチューニングを行った場合の同定結果を、表3.1に示す。初期値にかかわらず10%程度の誤差で同定が完了していることがわかる。

また、同じく、図3.6(b)の制御対象に対して異なる初期値からオートチューニングを行った場合のPIパラメータの変化の様子を図3.7に示す。異なる初期値に対しても適切にパラメータが収束している様子が見られる。

なお、制御対象の特性によっては同定結果に誤差が生じる。これは閉ループ系の応答に誤差の影響が現われにくい場合に起こり、例えば図3.6(c)ではこの制御対象の特性が主に L と K_0 の値に支配されるため T の同定結果に大きな誤差が残る。しかし、この同定誤差は、閉ループ系の応答にはほとんど影響を与えず、オートチューニングの実用上の問題にはならない。

上述したように、本手法は、同定・設計法（間接調整）の一種であるため、設計法を入れ替えることで、異なるコントローラにも用いることができる。そこで、PI制御に対する場合と同じ特徴量・ファジィ推論を用い、コントローラと設計法を変更してPID制御に対するオートチューニングを行った。PI制御の場合と同様に、コントローラ設計部においては部分的モデルマッチング法を用いた。

図3.8に、図3.6(b)の制御対象に対するシミュレーション結果を示す。最終的に、良好な応答が得られ、PI制御による図3.6(b)よりも高速な応答が実現できている。

以上のシミュレーション結果により、本手法にもとづく一次遅れ+むだ時間系に対するオートチューニングが有効であることが確認できた。PI制御、PID制御の両方に対し、同一のファジィルールとメンバシップ関数で良好な結果が得られている。

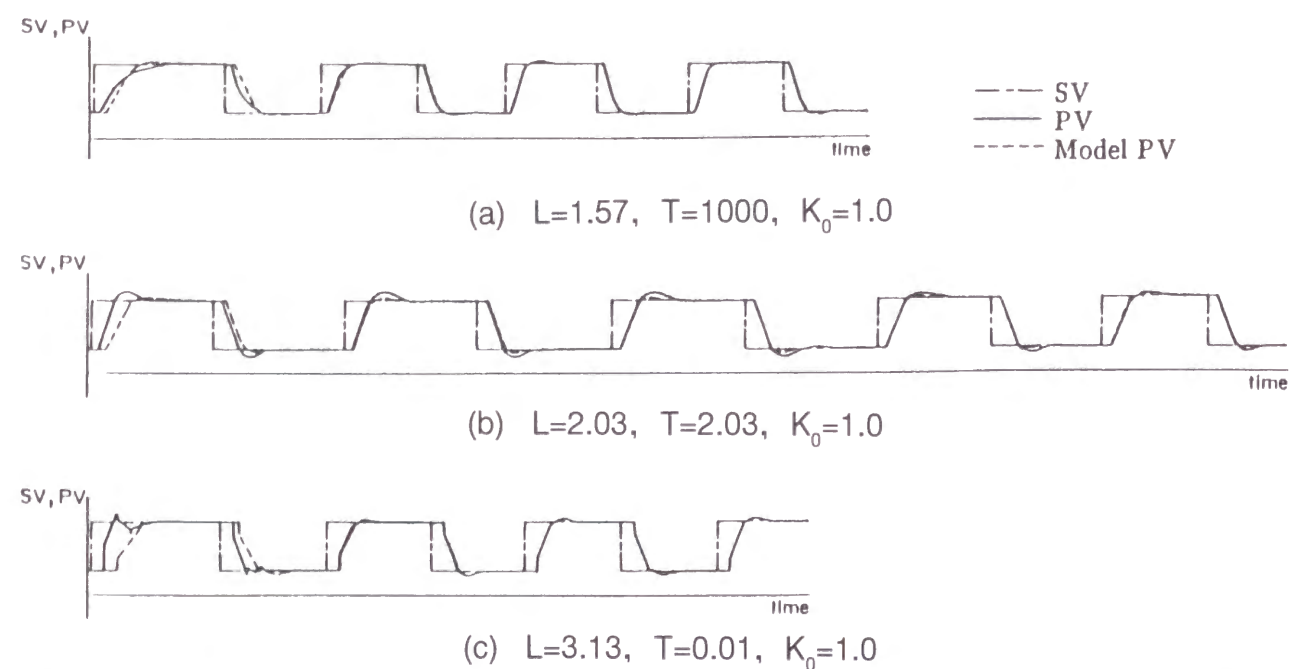


図3.6 一次遅れ＋むだ時間系に対するPI制御のオートチューニング結果

表3.1 一次遅れ＋むだ時間系の同定結果 ($L=2.03, T=2.03, K_0=1.0$)

初期値			同定結果		
L_m	T_m	K_{0m}	L_m/L	T_m/T	K_{0m}/K_0
4.06	4.06	2.0	0.97	1.05	1.03
1.015	4.06	2.0	0.96	1.05	1.04
4.06	1.015	2.0	1.12	0.88	0.91
1.015	1.015	2.0	1.10	0.90	0.93
4.06	4.06	0.5	0.98	1.00	1.05
4.06	1.015	0.5	0.93	0.90	0.97

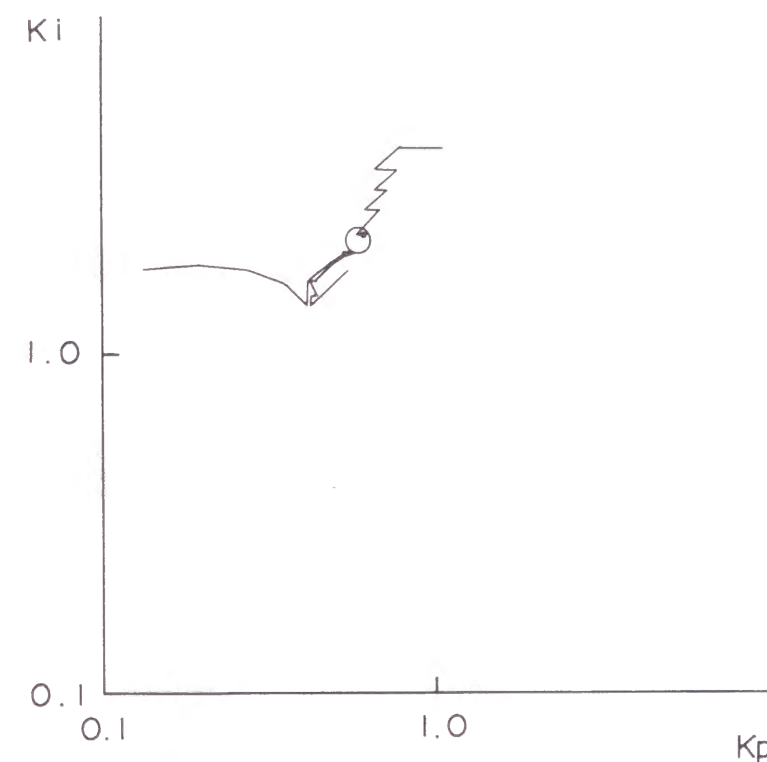


図3.7 PIパラメータの変化 ($L=2.03, T=2.03, K_0=1.0$)

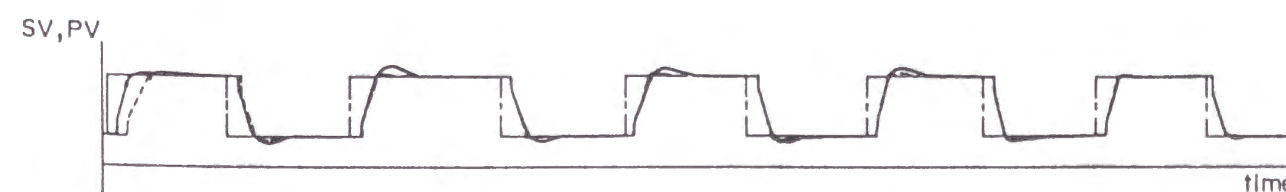


図3.8 一次遅れ＋むだ時間系に対するPID制御のオートチューニング
($L=2.03, T=2.03, K_0=1.0$)

3. 5 モータ制御系における負荷慣性モーメントの同定とオートチューニング

3.5.1 モータ制御系への適用

ここでは、モータを機構に取り付けて位置決めや指令値に追従させるモータ位置制御系（サーボ系）への提案手法の適用を考える。標準的なモータ位置制御系のブロック図を図3.9に示す。このモータ位置制御系は、電流、速度、位置の信号がフィードバックされ、それぞれ比例または比例・積分制御されている。図中、 J は負荷慣性モーメント、 K_{cp} 、 K_{ci} 、 K_{vp} 、 K_{vi} 、 K_{pp} はコントローラパラメータであり、それぞれ電流比例パラメータ、電流積分時定数、速度比例パラメータ、速度積分時定数、位置比例パラメータである。

このモータ位置制御系では、通常、電流ループ内の定数やトルク定数は、モータのパラメータとして与えられるため、予め明らかな場合が多い。一方、負荷の慣性モーメントなど取り付ける機構に依存するパラメータは、何らかの動作により値を同定する必要がしばしば生じる。特に、負荷慣性モーメント J は、その値を同定できれば、コントローラパラメータの適切な値を決定できる場合の多い主要な機構パラメータである。そこで、提案した同定法を J の同定に適用し、オートチューニングを行って、実験によりその有効性を確認する。

標準的なモータ位置制御系に対して本方式を適用した場合のブロック図を図3.10に示す。図中、 J は実際の負荷慣性モーメント、 J_m はモデルの負荷慣性モーメントを示し、 J_m を J に一致させることが同定の目的である。また、 K_{cp} 、 K_{ci} 、 K_{vp} 、 K_{vi} 、 K_{pp} は図3.9と同じコントローラパラメータである。

図3.10の下側の閉ループ系が実際のモータ制御系、上側の閉ループ系が制御対象モデルの制御系であり、これらは負荷慣性モーメントパラメータ J と J_m のみが異なっている。その他の各定数およびパラメータは、予めモータパラメータとして与えられた値および制御対象のコントローラのパラメータを採用しており、2つの閉ループ系で一致させている。

提案した同定法を適用する場合、より正確な同定結果を得るために特徴量を適切に選択する必要がある。図3.10の制御系では、電流 i 、速度 $\dot{\theta}$ 、位置 θ の信号を用いることができるので、適切な特徴量はこれらのいずれの信号から抽出すべきかについて検討する。

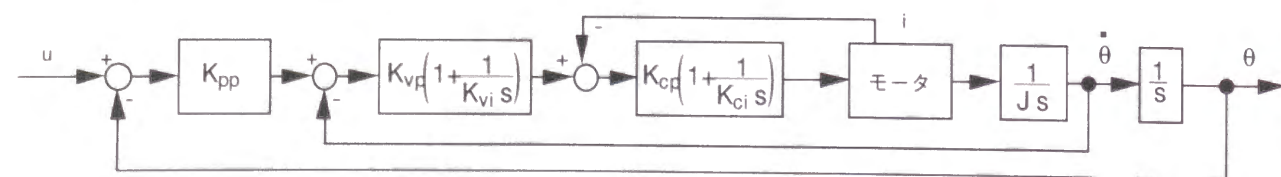


図3.9 モータ位置制御系（サーボ系）のブロック図

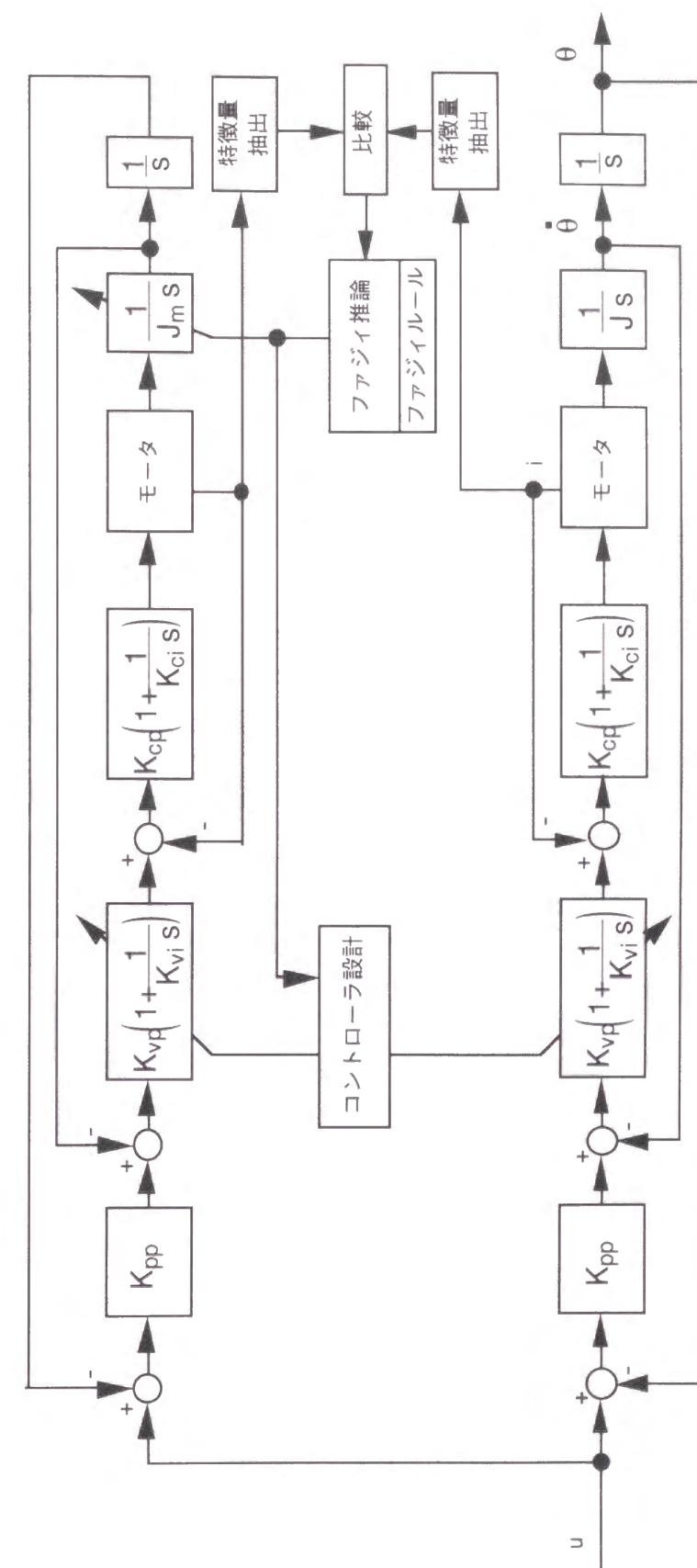


図3.10 モータ位置制御系に対する負荷慣性モーメントの同定とオートチューニング

同定のための特徴量はJとJmの違いによりなるべく大きな差が出るものが望ましい。そこで、入力uから電流、速度、位置までのそれぞれの伝達関数について、JとJmのみが異なる2つの閉ループ系の間の比を計算すると（ただし、簡単のため、電流ループの応答は十分速いとし、速度ループは比例制御のみとした）、次のようになる。まず、入力Uから電流Iまでの伝達関数の比は、

$$\frac{G_{cm}}{G_c} = \frac{(J/KT)s^2 + K_{vp}s + K_{pp}K_{vp}}{(J_m/KT)s^2 + K_{vp}s + K_{pp}K_{vp}} \frac{J_m}{J} \quad (3.7)$$

となる。ここで、Gc、GcmはそれぞれJとJmに対する電流iまでの伝達関数を示す。また、入力uから速度θ、位置θまでの伝達関数の比は、

$$\frac{G_{vm}}{G_v} = \frac{G_{pm}}{G_p} = \frac{(J/KT)s^2 + K_{vp}s + K_{pp}K_{vp}}{(J_m/KT)s^2 + K_{vp}s + K_{pp}K_{vp}} \quad (3.8)$$

となる。ここで、Gv、Gvm、Gp、GpmはそれぞれJとJmに対する速度θ、位置θまでの伝達関数を示す。

式(3.7)、式(3.8)から、JとJmの差は、速度、位置の信号には主に高周波成分にしか現われないが、電流信号には直流成分にも顕著に現われることがわかる。したがって、今回は同定のための特徴量は、ステップ状の位置指令値を入力uとした場合の電流信号から抽出した。具体的には、位置指令値入力後電流値が正の区間の時間積分値を特徴量として用い、制御対象側と制御対象モデル側のこの特徴量の比cmp_Iを、特徴量比較値とした。

cmp_Iを入力とするファジィ推論のためのルールとメンバシップ関数をそれぞれ図3.11と図3.12に示す。この場合は同定するパラメータが1個であるため、ファジィ推論は単純なものになっている。制御対象モデルのJmの修正はファジィ推論出力dJをもとに次式によって計算する。

$$J_m(k+1) = 2^{dJ(k)} J_m(k) \quad (3.9)$$

また、Jmの修正ごとに、速度ループのパラメータKvp、Kviを最適なものに変更するオートチューニングを行う。ここでのKvp、Kviの決定は、通常のモータ位置制御系で行われている位相余裕にもとづく古典的な設計法を用いる。

3.5.1 実験結果

上述のモータ位置制御系における慣性モーメントの同定とオートチューニングの有効性を確認するため、実際のモータを用いた実験を行った。図3.13に実験で用いた制御対象の概観を示す。図からわかるように、この実験装置は、モータに円盤状の負荷を直結でき、その負荷を簡単に着脱できる構成となっている。負荷の円盤の慣性モーメントは、モータロータの慣性モーメントの1/2であり、5枚まで取り付けることができるようになっている。従って、モータロータの慣性モーメントの1倍から3.5倍までの慣性モーメントを変化させた実験が可能である。

ルール1： cmp_Iが largeならば、
dJは positive.

ルール2： cmp_Iが middleならば、
dJは zero.

ルール3： cmp_Iが smallならば、
dJは negative.

図3.11 同定のためのファジィルール（モータ制御系）

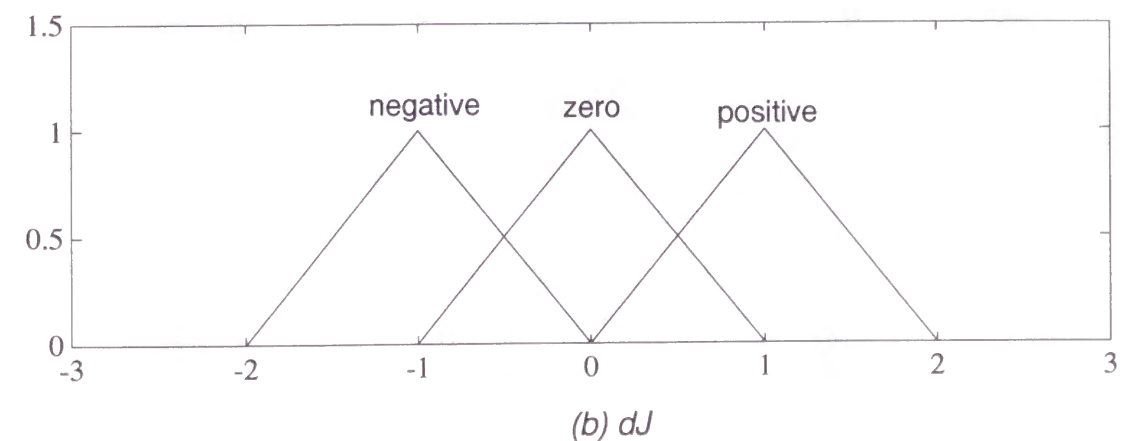
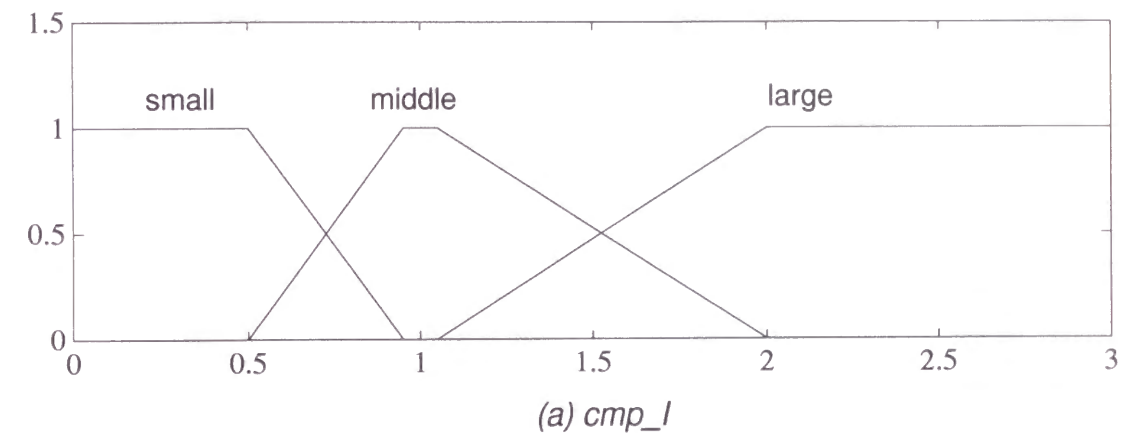


図3.12 メンバシップ関数（モータ制御系）

図3.14に実験結果を示す。図の(a)(b)(c)はそれぞれ1, 2, 3回目の入力に対する電流信号の時間応答を示しており、実線は実機の電流値、点線はモデルの電流値を示す。この結果は、 J_m の初期値をモータロータの慣性モーメントの値とし、モータにロータ慣性モーメントの2.5倍の負荷を取り付けた場合のものである。ファジィ推論による修正を2回行った後の3回目の入力に対しては、実機とモデルの電流信号がほぼ一致し、同定が完了していることがわかる。また上述のように、この実験では、オートチューニングも同時に行っている。1回目の実機の電流値では、停止時（時刻0.5付近）でやや振動的な応答が見られ、コントローラのパラメータが適切でないことがわかるが、2回目、3回目の応答では次第に改善され滑らかな応答が得られていることがわかる。

表3.2に、モータに様々な負荷を取り付けた場合の実際値と同定値との比を示す。ほぼ正確な同定値が得られていることがわかり、この応用における提案した手法の有効性が確認できた。

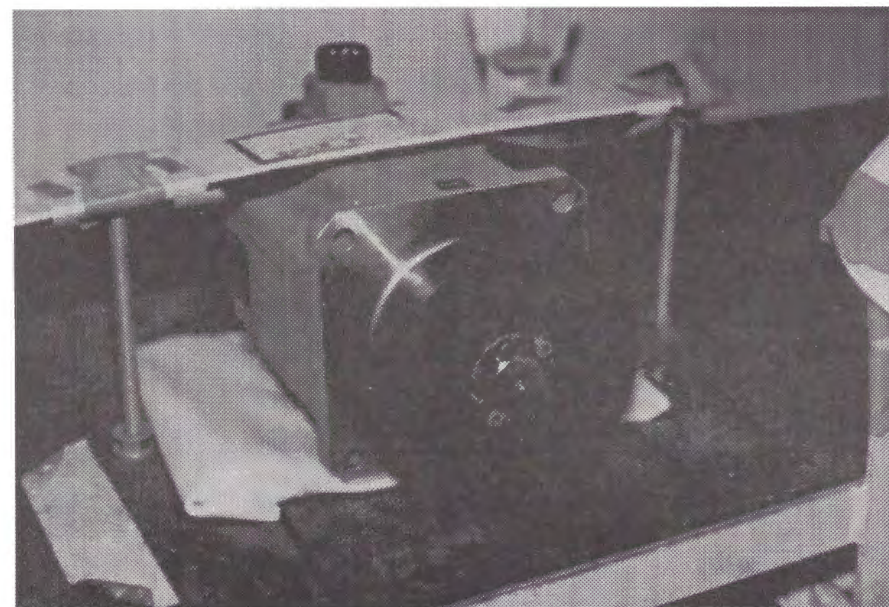


図3.13 実験用制御対象

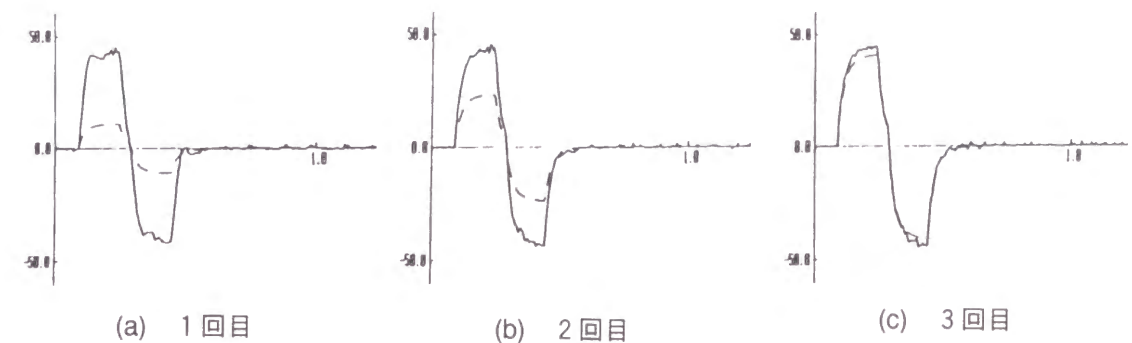


図3.14 負荷慣性モーメント同定の実験結果

表3.2 負荷慣性モーメントの 同定値と実際値の比

J モータロータ慣性モーメント	$\frac{J_m}{J}$
1.0	1.00
1.5	1.06
2.0	1.05
2.5	1.10
3.0	1.10
3.5	1.04

3. 6 おわりに

ファジィ推論により，閉ループ系の応答の特徴量から制御対象の同定を行う手法と，この同定法を用いたオートチューニング方式を提案した．このオートチューニング方式は特別な同定用信号を必要とせず，広い範囲の制御対象に柔軟に対応できるものである．プラント制御のモデルとして一般的に用いられる一次遅れ+むだ時間系，およびモータ位置制御系に対し，提案した方式の適用を行い，シミュレーションと実験によりその有効性を確認した．

今回提案した手法には，本文中に示したように純粋なパラメータ同定手法としては正確な同定結果が得られない場合があること，制御対象と制御対象モデルが構造的に異なっている場合のロバスト性の確認ができていないこと，同定パラメータが多くなるとルールが複雑になることといった問題点が残されている．しかし，本章での検討した範囲では十分に実用に耐える方式であるといえる．

4. オペレータノウハウを 考慮したサーボ系の オートチューニング

4. 1 はじめに

制御系のパラメータチューニングにおいて，熟練作業者はサーボ系の応答を評価し，自らのノウハウをもとにパラメータの修正を繰り返して行う場合が多い．ファジィ推論を用いてこの手順をそのまま取り込んだオートチューニング方式が，プラント制御の分野[10-16]や機構制御系[19-21]において従来より研究されている．この方式は，実際の動作中のデータ，特に応答波形の特徴量をもとにチューニングを行うため，外乱など実際の動作時に生ずる例外的現象に対応するルールを組み込みやすいという特徴があるが，用意したルールで対応できる制御対象の範囲が不明確になり，常に最適なパラメータが得られるとは限らないという問題がある．制御対象として，モータにより機構を駆動し位置決めを行うサーボ系を考えた場合，一般的に言ってプラント制御の場合より要求仕様が厳しいため，この点がより問題となる．

この問題を解決する1つの方式として，前章ではファジィ推論を用いた同定法によるオートチューニングを提案した．この方式は，応答波形の特徴量をもとに制御対象モデルのパラメータ同定を行い，そのモデルに最適なコントローラパラメータを決定するものである．この方式により特徴量にもとづく一般的なオートチューニング方式が実現されているが，例外的現象への対応などのオペレータのノウハウをそのままの形で組み込むことは困難である．

そこで，本章では，実際の動作中のデータをもとに，前章のファジィ推論を用いた同定法によるオートチューニングをベースとし，例外的な現象にも対応できるオートチューニング方式を提案する．この方式は，前章で述べた方式に，例外的現象に対応する部分をその上位層として階層的に持つものである．このような階層的な構成にすることにより，一般的な制御系設計手法と，オペレータのノウハウにもとづく例外現象への対応方式を，分離して考えることができる．

以下では、提案する方式の構成を示した後、サーボ系のパラメータ調整法について考え、実験によってその有効性を検証する。

4. 2 オートチューニング方式の構成

本章で提案するオートチューニング方式は、制御対象モデルの同定を行い制御パラメータの決定を行う部分と、制御対象モデルに含まれない例外的現象に対応できる部分を階層的に持つものである。この構成は、インテリジェントな制御を実現するための考え方として提案されている階層的な構造[41-42]に対応していると言える。このような枠組みを持つことにより、実用的なオートチューニングが実現できる。

図4.1に、提案するサーボ系のオートチューニング方式の構成概念図を示す。この方式は、オペレータノウハウ部と同定・設計部の2つのブロックから構成され、通常の動作指令入力に対する閉ループ系の入出力から、コントローラの制御パラメータを繰り返して修正するものである。

一般に、オペレータのノウハウによる例外的現象への対応は、コントローラパラメータへの制限となって現れる場合が多い。そこで、オペレータノウハウ部では、熟練作業者のノウハウをもとに、閉ループ系の入出力から制御パラメータに対する制限情報を決定し、同定・設計部に送る構成とする。一方、同定・設計部では、まず制御対象モデルの同定を行い、オペレータノウハウ部からの情報も考慮して、制御パラメータの設計を行う。オペレータノウハウ部からの制限情報がない場合には、通常のオートチューニングを行うことになる。

オペレータノウハウ部では実際の動作中の閉ループ系からのデータを用いる必要があるため、同定・設計部でも同じデータから同定を行うことが望ましい。そこで、ここでの同定・設計部では、前章のファジィ推論を用いた同定法によるオートチューニングを用いる。

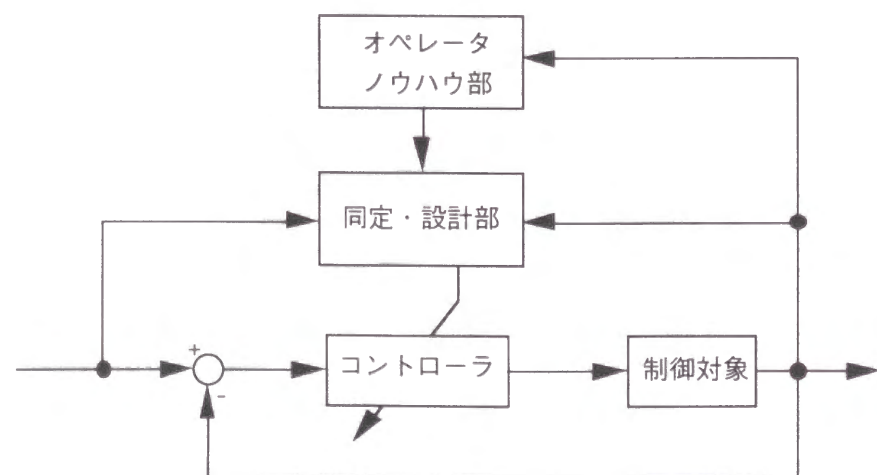


図4.1 オートチューニング方式の構成

4. 3 サーボ系の制御パラメータ調整

ここでは、サーボ系のパラメータ設定時に考慮すべき点について述べ、それをもとにオートチューニングへの展開を考える。図4.2に、対象とするサーボ系のブロック図を示す。これは、前章の図3.9とほぼ同一であるが、制御対象に外乱が加わっている点が異なっている。このサーボ系は、電流、速度、位置フィードバックを持ち、それぞれのループでPI（比例・積分）制御、PI制御、P制御を行っている標準的なモータ位置制御系である。図において、 K_{cp} 、 K_{ci} はそれぞれ電流ループの比例、積分パラメータ、 K_{vp} 、 K_{vi} はそれぞれ速度ループの比例、積分パラメータ、 K_{pp} は位置ループの比例パラメータである。以下ではこれらのパラメータを制御パラメータと呼ぶ。

サーボ系では、可能な限り要求仕様を満足するように制御パラメータを決定する必要がある。制御パラメータの決定に影響を与える要因としては、(1)モータの定数（トルク定数等）、(2)コントローラのサンプリング時間、(3)負荷（モータ+機構）の慣性モーメント、(4)機械振動、(5)飽和などがあげられる。

これらのうち、(1)モータの定数、(2)コントローラのサンプリング時間、(3)負荷の慣性モーメントの各要因は、たとえば伝達関数のパラメータとして、制御対象モデルに比較的容易に含めることができる。この伝達関数パラメータを決定することにより、一般的な制御系設計法を用いて要求仕様を満たす最適な制御パラメータが決定できる。

一方、(4)機械振動、および(5)飽和は、その特性のモデル化が困難なものであり、実際の動作中の信号から認識できるものである。（機械振動については、バネ慣性系としてモデル化する場合があるが、一般にそのパラメータは変動が大きく同定が困難な場合が多い。したがって、ここではモデル化が困難な要因として扱う。）熟練作業者が制御パラメータの調整を行う場合、これらの要因は実際の動作中のデータをもとに、

「機械振動が大きければ、 K_{vp} を下げる。」 (K4.1)

「飽和が生じれば、 K_{pp} を下げる。」 (K4.2)

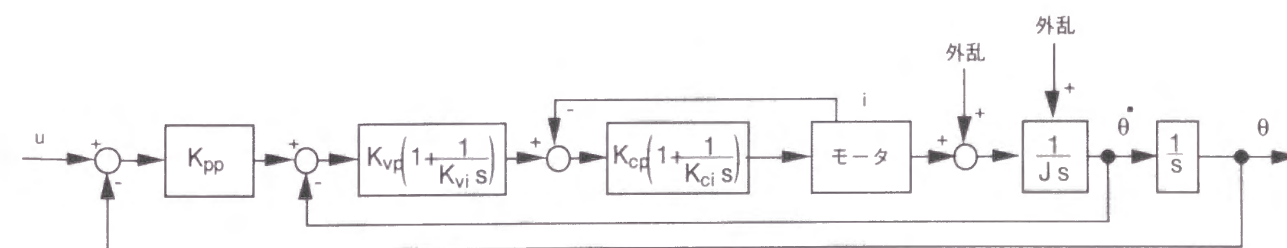


図4.2 サーボ系のブロック図

といったノウハウによって考慮される。

したがって、制御パラメータの調整作業の自動化を行う場合、制御対象モデルにもとづく方式をベースとし、実際の動作中に機械振動やノイズが発生した場合には試行錯誤的に妥協点を見つけるような構成にすることが实际的である。

4. 4 慣性モーメントの同定と機械振動の抑制への適用

以上のような枠組みのもとで、サーボ系の制御パラメータのオートチューニングを実現し、提案した手法の有効性を示す。オートチューニングで対象とする調整作業は、予め用意されたコントローラとモータを未知の機構系に取り付けた場合に行われる。従って、4. 3で示した制御パラメータに影響を与える要因のうち、(1)モータ定数、(2)コントローラのサンプリング時間は既知である。すなわち、同定・設計部における制御対象モデルの未知パラメータとしては(3)負荷の慣性モーメントのみとなる。また、オペレータノウハウ部では(4)機械振動に対するノウハウ(K4.1)を実現することとした。今回のオートチューニングは、(3)、(4)の各要因によって直接影響を受けるKvp、Kviの設定を目標とする。

チューニングに利用する入力uは通常の位置指令であるステップ状のものとし、この入力を数回繰り返しその応答波形をもとにチューニングを行う。以下では、オペレータノウハウ部および同定・設計部の内容について簡単に述べる。

4.4.1 オペレータノウハウ部

オペレータノウハウ部では、上述したように機械振動に対するノウハウ「機械振動が大きければ、Kvpを下げる」(K4.1)を実現する。具体的には、機械振動の評価値Vとその許容値Vmaxをもとに、Kvpの制限値Krstを決定する。

機械振動の評価値Vの値は、機械振動の周波数がサーボ系の応答より十分大きいと仮定し、位置指令入力時の電流値のハイパスフィルタ通過信号の2乗積分値とした。機械振動の許容値Vmaxは、オートチューニングを実行する前に予め設定しておく。

Kvpの制限値Krstは今回までの位置指令入力時のデータをもとに決定する。すなわち、Kokを今回までの試行でVがVmaxより小さい最大のKvpの値とし、Kngを今回までの試行でVの値がVmaxより大きい最小のKvpの値とする。この時、制限値Krstは次式で計算する。

$$Krst = \sqrt{Kok \cdot Kng} \quad (4.1)$$

Kokの初期値はKvpの初期値より十分小さな値とし、Kngの初期値は(4.1)式の計算結果KrstがKvpの初期値より十分大きな値となるように選んだ。このKrstの値が、ステップ状の入力による試行ごとに同定・設計部に送られ、コントローラパラメータの設計時に利用される。

4.4.2 同定・設計部

図4.3に同定・設計部の詳細な構成図を示す。この方式は、前章のファジィ推論による同定法にもとづくもので、2つの閉ループ系（実際の制御対象を含むものと、制御対象モデルを含むもの）を持ち、2つの閉ループのコントローラは同一の制御パラメータを持つ。図中、Jは実際の負荷の慣性モーメント、Jmは負荷の慣性モーメントのモデルパラメータを示す。

ステップ状の位置指令が入力された場合、2つの閉ループの応答からそれぞれ特徴量を抽出する。この2つの特徴量の差はJとJmの差に起因するものであるため、この特徴量の差を入力とするファジィ推論を行って、JmをJに近づけるように修正する。この修正を繰り返すことによりJmをJに一致させる。ここでは、前章での解析結果にもとづき、最もJmとJの差が顕著に現われる特徴量として、電流信号の時間積分値を用いることとした。

パラメータ設計では、Jmの修正ごとに次の手順を行う。まず修正されたJmの値に最適なKvp、Kviを計算する。その結果得られたKvpと作業者ノウハウ部で求められたKrstを比較し、Krstが小さければKvpをKrstとする。このとき、Kviの値は、修正されたKvpに応じた適切な値に変更する必要がある。このようにして求めたKvp、Kviをそれぞれの閉ループの制御パラメータとする。

4.4.3 アルゴリズム

本方式の手順をまとめると以下ようになる。

- (1)Jmの初期値をモータのロータ慣性モーメントとする。
- (2)Jmの値をもとに、Kvp、Kviの初期値を決定する。
- (3)ステップ状の位置指令を入力する。
- (4)オペレータノウハウ部において、振動評価値Vを求め、Vmaxとの比較を行い、Kok、Kngを修正する。
- (5)Kok、Kngから(4.1)式により、Krstを決定する。
- (6)同定設計部において、電流信号をもとにファジィ推論を行いJmを修正する。
- (7)Jm、KrstをもとにKvp、Kviを決定する。
- (8)Jm、Kvp、Kviが変化しなくなるまで、ステップ(3)以降を繰り返す。

4. 5 実験結果

提案した手法の有効性検証のため、機械振動周波数と負荷の慣性モーメントを変更できる機構を試作し、実験を行った。図4.4、図4.5に、試作した実験システムの構成と外観を示す。この実験システムは、モータにトーションバーを介して円盤を取り付けたものである。トーションバーの長さを取り付ける円盤の数が変更できる構造になっており、一般的な2慣性とバネからなる機械振動系において、バネ定数と機械側慣性モーメントを容易に変更できる構造になっている。以下では、この実験システムを用

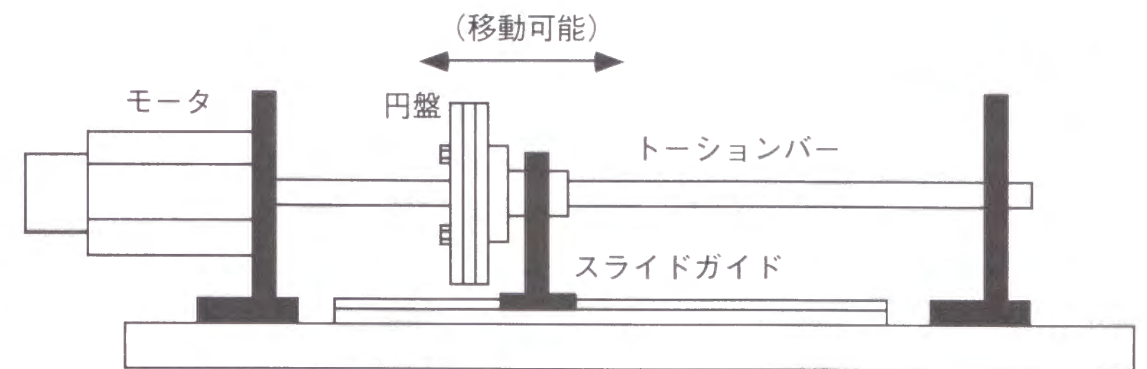
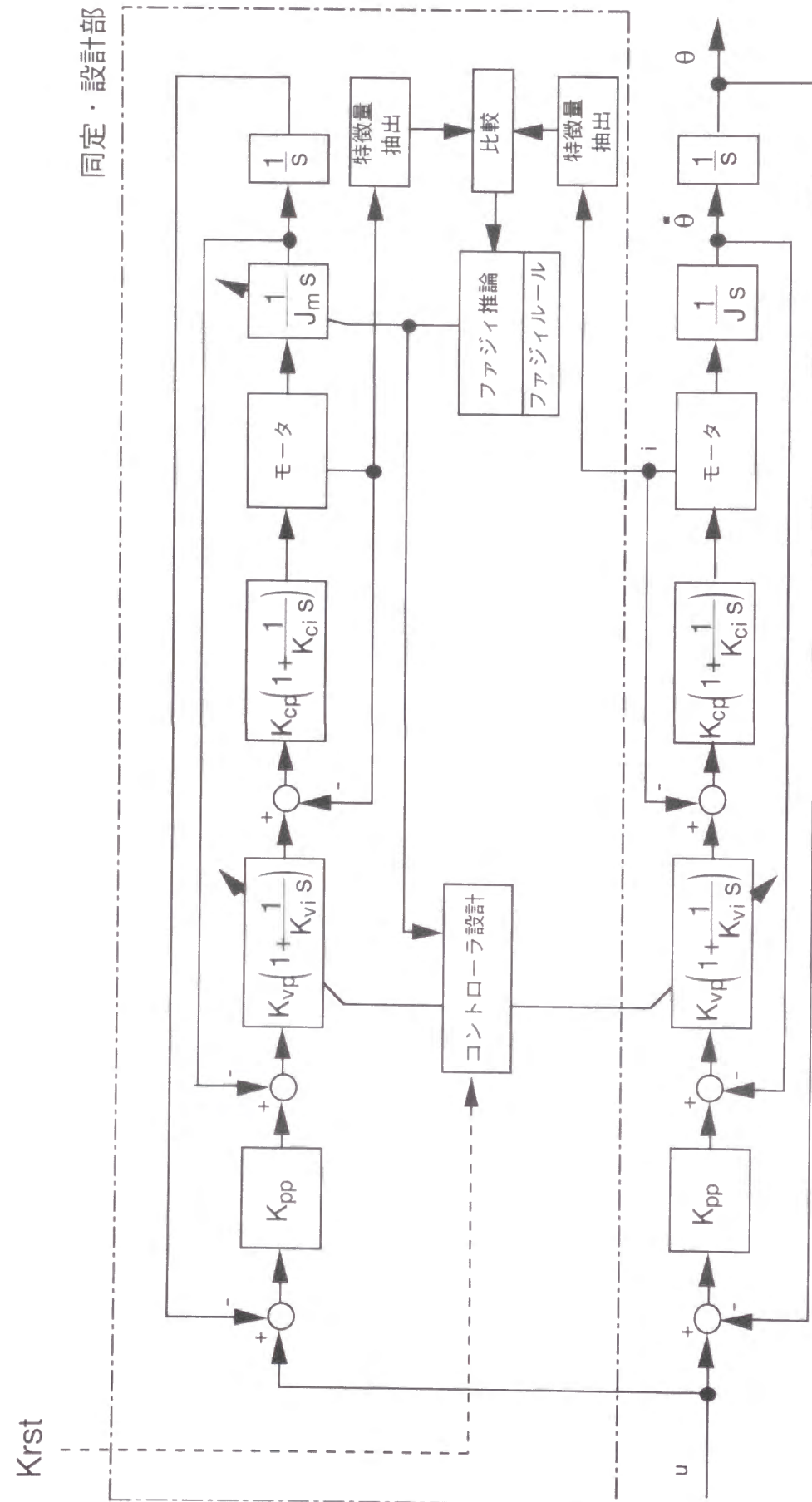


図4.4 実験システムの構成

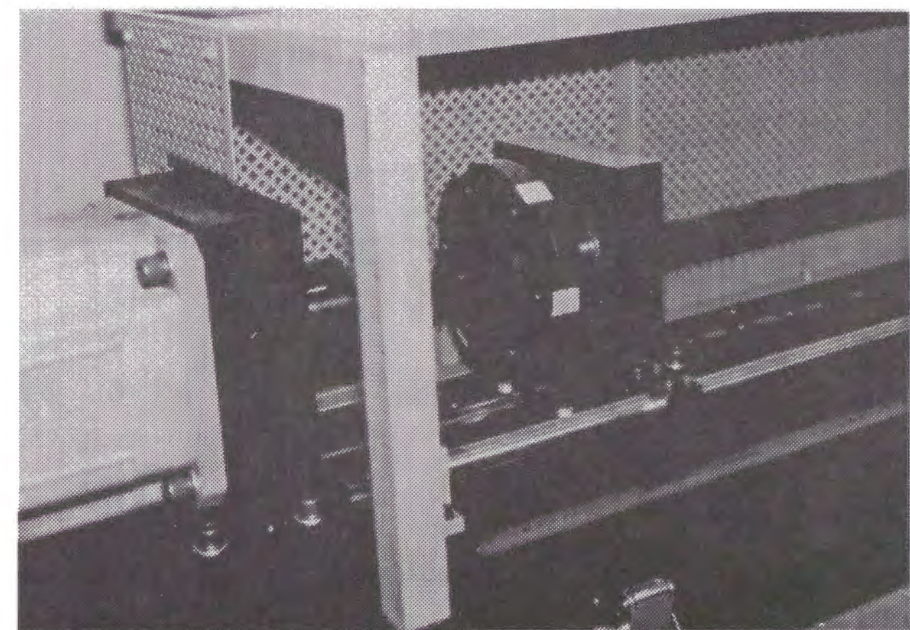


図4.5 実験システム

いて、機械振動周波数と負荷の慣性モーメントを変更した3種類の制御対象に対する実験結果を示す。

図4.6の9つのデータはそれぞれ1回目から9回目までのステップ状位置入力信号に対する電流信号を示し、実線は実際のモータの、破線はモデルの信号を示す。また、図4.7は、同じ実験においての位置入力信号の各入力回数における J_m 、 K_{vp} 、 V の値の変化の様子を示す。

1回目と2回目の位置信号入力のうち、 J_m は増加し、またその J_m に応じて K_{vp} も増加している。3回目の入力によって、負荷の慣性モーメントの同定は終了し、ほぼ実際の慣性モーメント J に近い J_m が求まっている。しかし、この3回目の入力では機械振動が大きくなり、 V が許容値 V_{max} より大きくなっている。従って、4回目の入力以後では、 V が V_{max} より小さくなる K_{vp} を徐々に探索し、9回目の入力で適切な値を決定している。

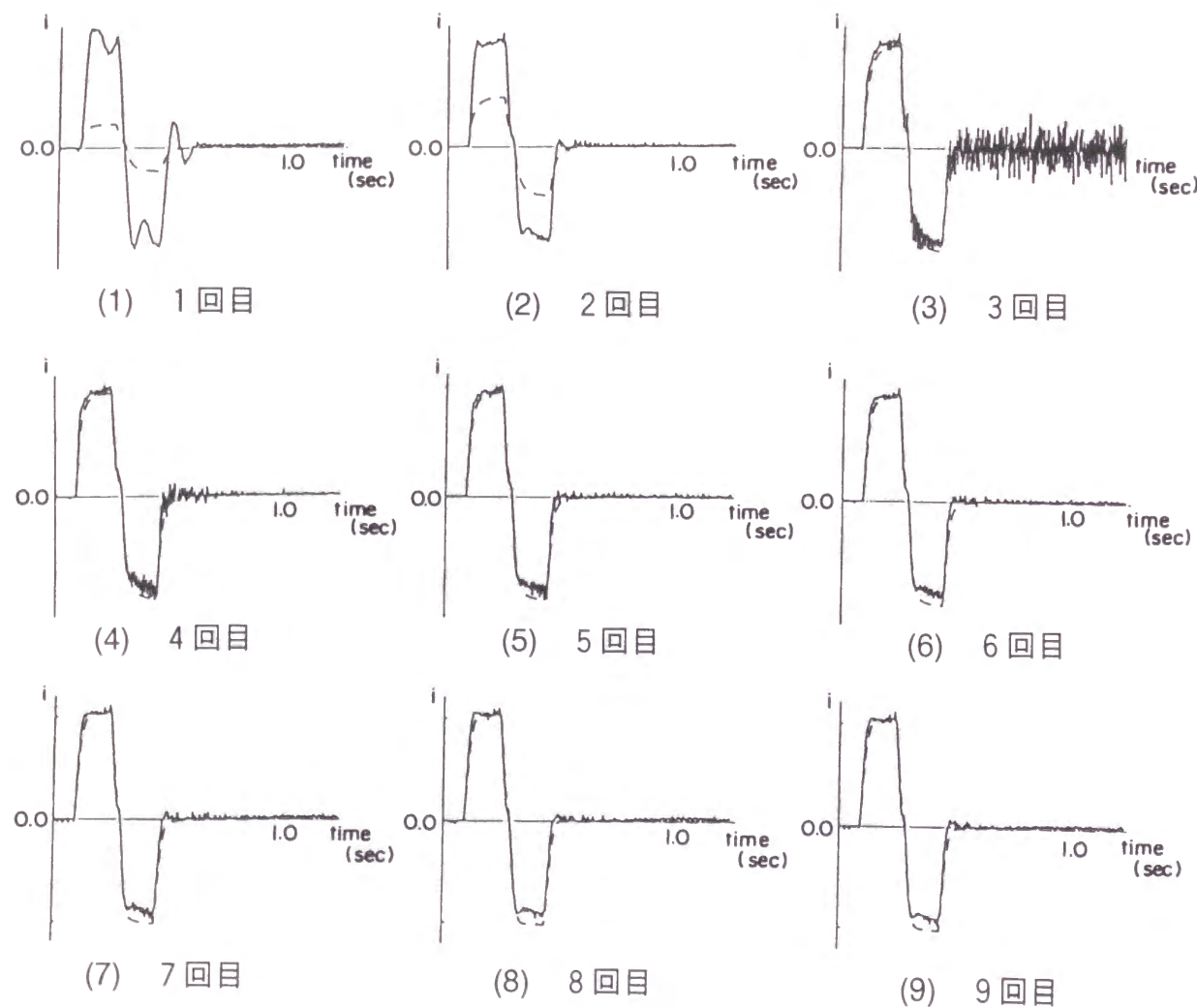


図4.6 実験結果1 (電流信号)

図4.8は、機械振動周波数が十分に高い場合の J_m 、 K_{vp} 、 V の値の変化の様子を示す。この場合、3回目の入力までで負荷の慣性モーメントの同定は終了し、振動評価値 V の値も許容値 V_{max} を越えていないため、適切な K_{vp} の設定ができていることがわかる。

図4.9は、機械振動周波数が低い場合の J_m 、 K_{vp} 、 V の値の変化の様子を示す。この場合、初期値として設定した K_{vp} の値により機械振動が許容値を越えている。3回目の入力までで負荷の慣性モーメントの同定は終了しているが、 K_{vp} の値は J の同定値とは無関係に機械振動が許容値を越えない値を探索している。最終的には、振動評価値 V の値が許容値 V_{max} を越えない適切な K_{vp} の設定ができていることがわかる。

この他にも、機械振動周波数と負荷の慣性モーメントを様々に変化させ、実験を行った。結果として、機械振動の影響が小さい場合には慣性モーメントに最適な制御パラメータが設定され、機械振動の影響が大きい場合には機械振動を許容値以下に抑える制御パラメータが設定された。

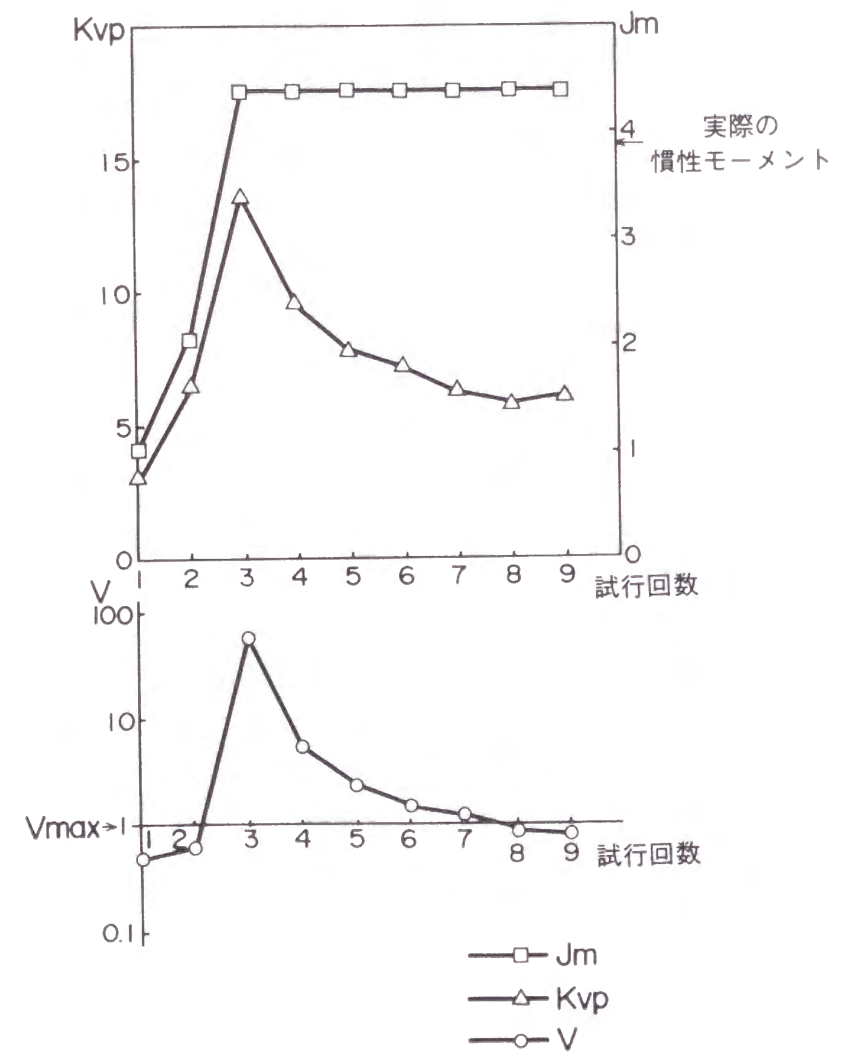


図4.7 実験結果1 (J_m 、 K_{vp} 、 V の変化)

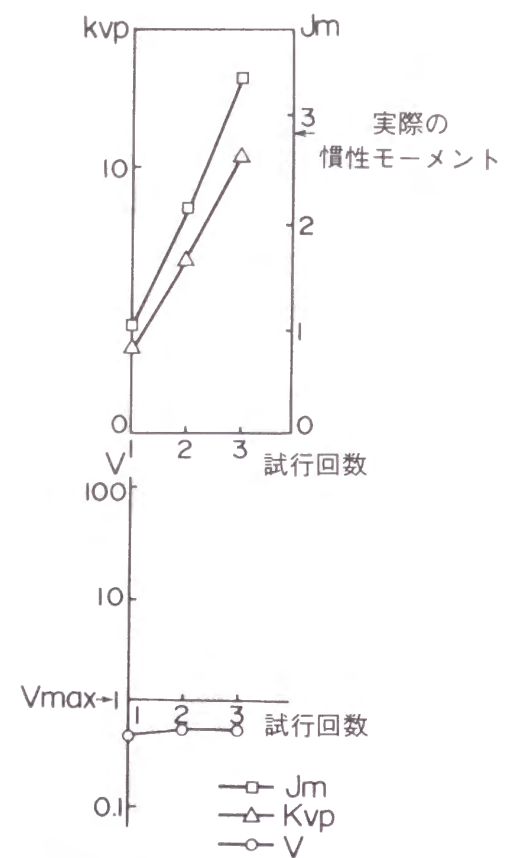


図4.8 実験結果 2 (J_m , K_{vp} , V の変化)

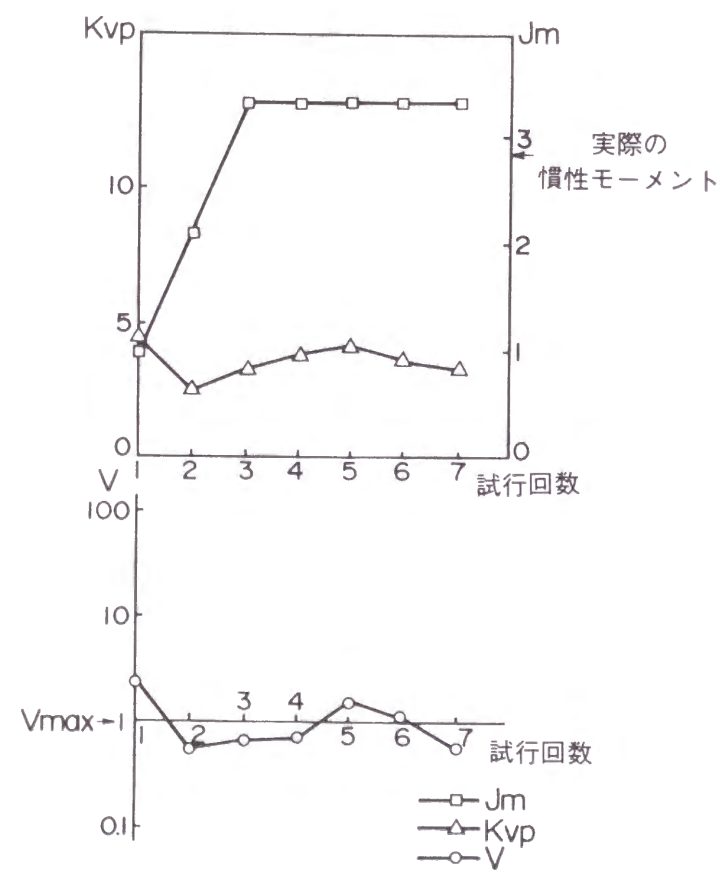


図4.9 実験結果 3 (J_m , K_{vp} , V の変化)

4. 6 おわりに

本章では、実際の動作中のデータをもとに、前章のファジィ推論を用いた同定法によるオートチューニングをベースとし、例外的な現象にも対応できるオートチューニング方式を提案した。この方式は、オペレータノウハウを取り込んで例外的現象に対応する部分を上位層として階層的に持つものである。この枠組みをもとに、サーボ系を対象として制御パラメータを自動的に設定するオートチューニング方式を考え、実験によりその有効性を確認した。このような階層的な構成にすることにより、一般的な制御系設計手法と、オペレータのノウハウにもとづく例外現象への対応方式を、分離して考えることができる。制御パラメータに影響を与える要因は、ここで検討したもの以外にも状況に応じて様々に存在するが、本章で示した枠組みにより柔軟に対応できると考えている。

5. 高精度軌跡制御のための 2自由度サーボ系と オートチューニング

5. 1 はじめに

工作機械やロボットなどのメカニカルシステムでは、指定した軌跡通りの高速な動作を実現する高性能なサーボ系が要求される。本章では、この要求を実現するためのサーボ系として、2自由度制御の考え方をもとに新たな構成のサーボ系を考え、そのオートチューニング方式について述べる。このような新しい制御方式を採用すると、従来のPID制御のように実システムにおける調整作業のノウハウ蓄積がないため、オートチューニング機能がさらに重要になる。

高精度軌跡制御を実現するためには、軌跡誤差発生的主要原因である負荷の慣性モーメントや摩擦の大きさに対応できる制御方式が必要となる。従来から、高精度な軌跡制御を実現する制御方式として、フィードバック系の逆特性を持つフィードフォワード補償器と摩擦補償とを併用する方式[30]や、外乱を推定するオブザーバを用いて摩擦や慣性モーメントの大きさを推定し補償する方式[33, 34]などが提案されている。前者の方式は、工作機械のXYテーブルにおける高精度軌跡制御を実現しているが、調整作業の自動化に関しては述べられていない。後者の方式は、フィードバック制御系の構成がPID制御に比べて複雑でリアルタイムの計算量が増加し、また、それぞれ摩擦あるいは慣性モーメントのいずれかへの補償しか対象としていない。さらに、慣性モーメントや摩擦の大きさなどを同時に同定する方式が提案されている[27, 28]が、これは制御対象に同定のための特別な信号の入力を要求する。前章までの方式においても慣性モーメントの同定を行ったが、その目的は主にフィードバック系の安定性に主眼が置かれたものであった。

本章では、まず、2自由度制御の考え方にもとづく高精度サーボ系を構成し、その制御定数のオートチューニングを実現する。このサーボ系は、従来のPID制御にフィードフォワードを加えたシンプルな構造であり、慣性モーメント、粘性、固体摩擦から

なる制御対象モデルの逆特性をフィードフォワード部に実現している．すなわち，提案するサーボ系は，主要な軌跡精度劣化要因をフィードフォワードにより補償し，それ以外のモデル化誤差などはフィードバックにより補償するものである．また，提案するオートチューニング方式は，この2自由度サーボ系の構造の特徴を利用して，実際の軌跡動作中に制御対象モデルの各パラメータを同定し，フィードバック，フィードフォワード双方の制御定数を修正する．この方式により，軌跡動作を繰り返すごとに精度が向上するサーボ系が実現できる．

5. 2 高精度軌跡制御のための2自由度サーボ系とオートチューニング

5.2.1 メカニカルシステムの運動方程式

本章では，制御対象として，高軌跡精度が要求される代表的なメカニカルシステムであるXYテーブルを考える．高精度軌跡制御を実現するためには，制御対象の特性を把握することが必要である．XYテーブルにおいて軌跡誤差に影響を与える要因としては，負荷の慣性モーメントによる慣性力，粘性摩擦などによる粘性力，固体摩擦などがある．これらは，たとえば円軌跡に沿って動作させる場合，半径減少や速度反転時の突起といった誤差となって現れる[43]．そこで，ここでは制御系設計の基本となるXYテーブル各軸の運動方程式として次式を用いる．

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + f \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}) + \tau_d = \tau_r \quad (5.1)$$

ただし， θ ， $\dot{\theta}$ ， $\ddot{\theta}$ はそれぞれモータの回転角度，角速度，角加速度， J はモータ及びテーブルのモータ回転軸換算慣性モーメントの和， c は粘性係数， f は固体摩擦トルク， τ_d は左辺の第3項までに含まれない外乱を表すトルク， τ_r はトルク指令， $\text{sgn}(\cdot)$ は引数が正の場合は1，負の場合は-1，0の場合は0となる関数を示す．固体摩擦は実際にはより複雑な特性を持つ[33]が，ここでは簡単な制御系を実現するために式(5.1)左辺第3項のように簡略化し，誤差分は τ_d に含めた．このメカニカルシステムモデルのブロック図を図5.1に示す．

5.2.2 2自由度サーボ系の構成

ここでは，目標値応答とフィードバック特性を別々に設定できる図5.2の2自由度制御系[44]をもとに高精度サーボ系を実現する．図中， P は制御対象の特性， P_m は制御対象モデルの特性， C_f は前置補償器の特性， C_b はフィードバック補償器の特性であり， r は指令値， y は制御対象出力である．図5.2において P と P_m が同一とすると r から y までの特性は C_f となる．すなわちこの構造の制御系では，目標値応答特性を C_f で決め，モデル化誤差やモデルに含まれない外乱などは C_b により補償する．

図5.2の2自由度制御系を図5.1の制御対象に用いた場合のサーボ系を図5.3に示す．図中， θ_r は位置指令値， τ_{rf} はフィードフォワードトルク指令， τ_{rb} はフィードバックトルク指令， J_m ， c_m ， f_m はそれぞれ J ， c ， f に対応する制御対象モデルの定数， K_p ，

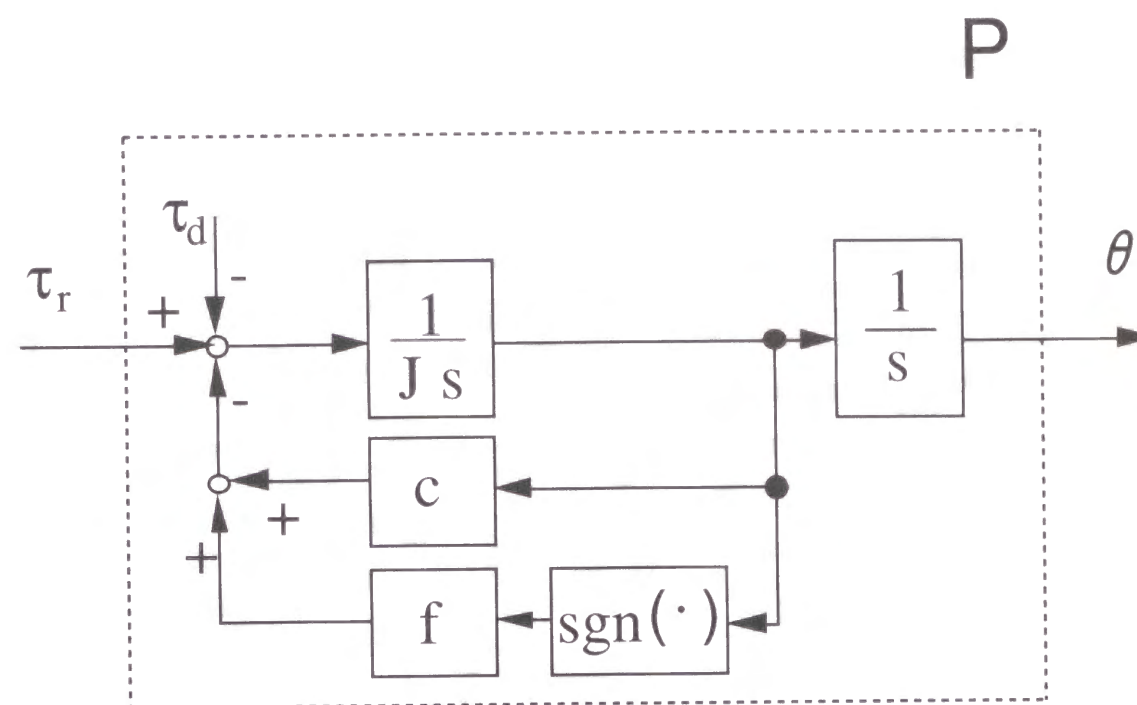


図5.1 制御対象モデル

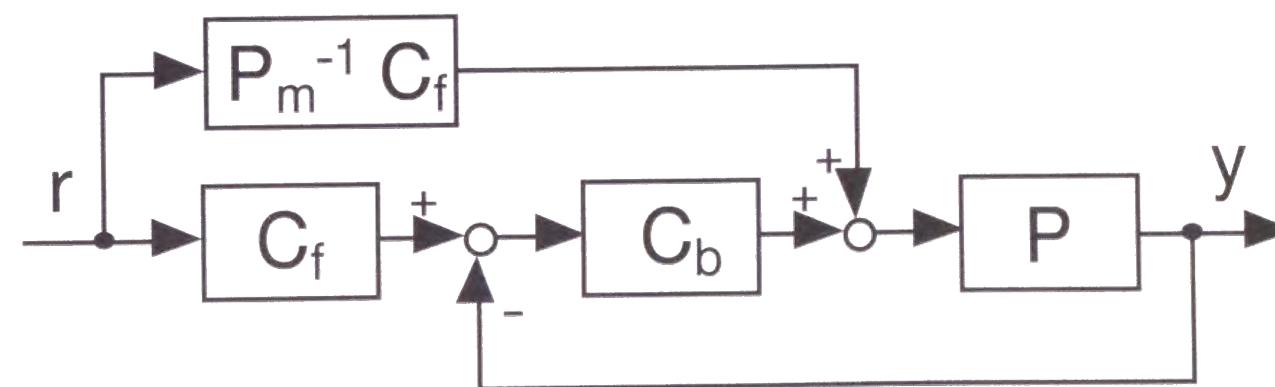


図5.2 2自由度制御系

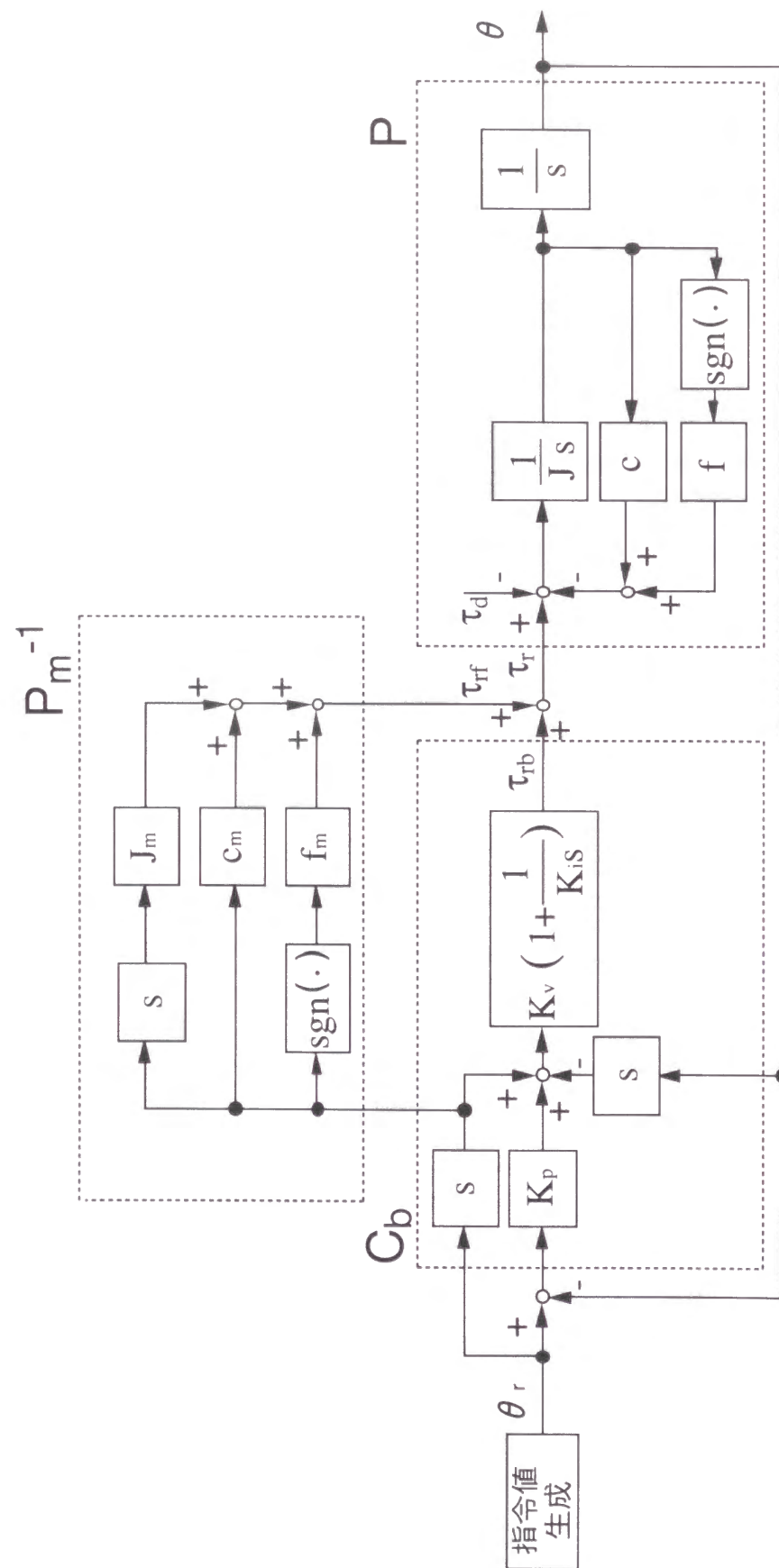


図5.3 高精度軌跡制御のための2自由度サーボ系ブロック図

K_v , K_i はそれぞれ位置ループ比例パラメータ, 速度ループ比例パラメータ, 速度ループ積分時定数である。

このサーボ系は, $J_m = J$, $c_m = c$, $f_m = f$, かつ $\tau_d = 0$ の場合, θ_r と θ が一致し制御対象を指令値通りに動作させることができる。また, 上述の条件が満たされない場合には, C_b 部を可能な限りハイゲインにしておくことにより, 誤差を小さくすることができる。すなわち, これらのパラメータを適切に調整することにより, 高精度な軌跡制御が実現できる。また, このサーボ系は, 従来のPID制御に速度, トルクをフィードフォワードしたシンプルな構造であり, 計算量をさほど増やすことなく容易に実現することができる。

固体摩擦補償の点から図5.3のサーボ系をみると, 指令値の速度をもとに摩擦補償を行う構成になっている。これは, サーボ系の遅れに対する補償を並行して行い, 制御対象がほぼ指令値どおりに動作しているとみなせるためである。従来の摩擦補償は, 速度の検出値をもとにする場合が多い[30, 33]が, これは速度検出器の低分解能やノイズによる悪影響を受けやすい。図5.3の摩擦補償方式は, より実用的なものといえる。

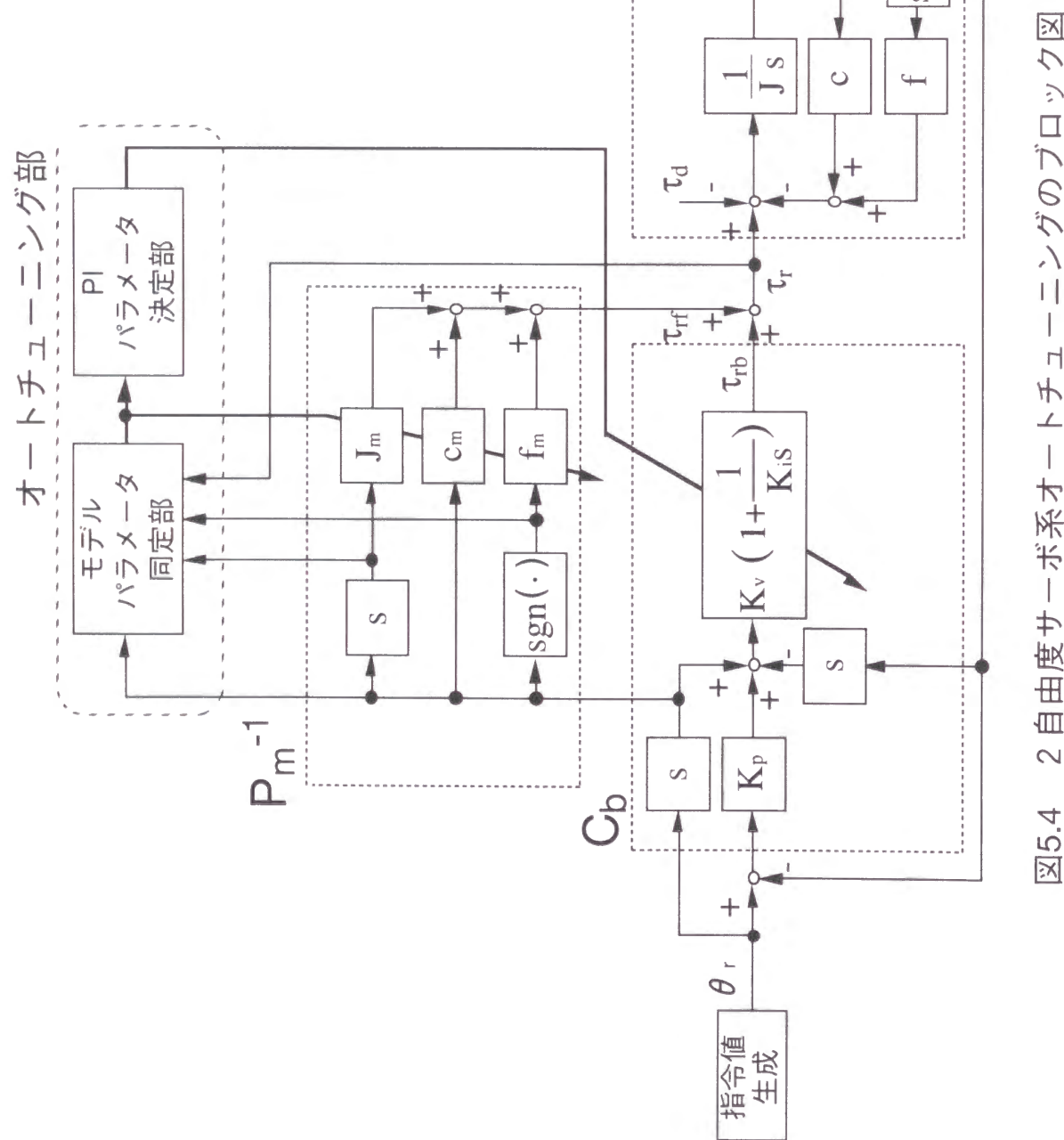
なお, 図5.3では, 図5.2の C_f が陽に現れていない。図5.2では完全なモデル化が可能な場合でも r と y の間に $y = C_f \cdot r$ という関係がある。軌跡制御を行う場合には θ_r と θ を完全に一致させることが目標であるため, C_f に相当する特性は予め指令値発生部で考慮しておく必要がある。すなわち, θ_r は, 制御対象モデルの誤差が多いと考えられる高周波域の成分をあまり含まず, 2回微分可能な滑らかな信号である必要がある。

5.2.3 制御定数のオートチューニング

前節で示した高精度サーボ系を容易に使用するために, 図5.3の P_m^{-1} , C_b 内の定数を自動設定するオートチューニングを実現する。ここでは, チューニングのための特別な動作をさせることなく, 実際の動作中のデータからオートチューニングを実現することを目指す。これにより, 軌跡動作を繰り返すごとに精度が向上していくサーボ系が実現できる。

図5.4に2自由度制御系に対するオートチューニング方式のブロック図を示す。このオートチューニング方式は, まず, 制御対象モデルのパラメータ J_m , c_m , f_m を同定する部分と, その結果をもとにPIコントローラのパラメータを変更する部分から構成されている。

まず, 制御対象モデルのパラメータ J_m , c_m , f_m の同定を考える。図5.2の P_m^{-1} においては, この同定値がそのままフィードフォワード部の制御パラメータとなる。図5.4において制御対象パラメータが完全に同定できた場合には, τ_{rb} が0となり, τ_{rf} と τ_r が一致する。そこで, 動作中の θ_r と τ_r を保存し, 最小2乗法[40]により次式のように J_m , c_m , f_m を求める。



$$\begin{bmatrix} J_m \\ c_m \\ f_m \end{bmatrix} = (\Theta_r^T \cdot \Theta_r)^{-1} \cdot \Theta_r^T T_r \quad (5.2)$$

ただし,

$$T_r^T = [\tau_r[1] \quad \tau_r[2] \quad \cdots \quad \tau_r[n]] \quad (5.3)$$

$$\Theta_r^T = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_r[1] & \ddot{\theta}_r[2] & \cdots & \ddot{\theta}_r[n] \\ \dot{\theta}_r[1] & \dot{\theta}_r[2] & \cdots & \dot{\theta}_r[n] \\ \text{sgn}(\dot{\theta}_r[1]) & \text{sgn}(\dot{\theta}_r[2]) & \cdots & \text{sgn}(\dot{\theta}_r[n]) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

ここで, n は同定に用いるデータの数, $[m]$ は時刻順に並べたときの m 番目のデータ, X^T は X の転置を示す.

この同定法では, 同定のための主要データである θ_r がコントローラ上で生成した指令値であるため, ノイズの影響を受けにくい. しかし, チューニングの初期段階で P_m が P と大きく異なる場合には, θ_r と θ はずれるため, τ_r は望ましいトルク指令値とはいえない. したがって, 1 回の動作データから最適な同定値を求めることはできず, 動作を繰り返すことで収束させる必要がある. 後に示す実験では 2, 3 回の動作では収束値が得られている.

図5.2の C_b は, 可能な限りフィードバック系をハイゲインにすることが望ましい. しかし, 実際にはコントローラのサンプリング時間, 高周波域のノイズなどの影響で, フィードバック系として実現可能な交差周波数の最大値 ω_c は決まる. そこで, C_b のオートチューニングとしては, 同定値 J_m に対し交差周波数が ω_c となるように速度ループ比例パラメータ K_v を決定した. ただし, 安全のため K_v 修正時の増加率は最大1.5倍までに制限している. また, K_p , K_i は簡単のため固定とした.

オートチューニングの手順をまとめると次のようになる.

- 1) 制御定数の初期値を決める. すなわち, J_m をモータのみの慣性モーメント, $c_m = f_m = 0$ とし, K_v を J_m から求める.
- 2) 制御対象を動作させ, θ_r と τ_r を保存する.
- 3) 式(5.2)により J_m , c_m , f_m を計算し, K_v を J_m から決定する.
- 4) 2)以降を繰り返す.

5. 3 実験結果

5.3.1 2自由度サーボ系による高精度化

提案した高精度サーボ系とそのオートチューニングについて、その有効性を実験で確認する。制御対象は、2つのDCサーボモータ（200W）により駆動されるXYテーブルで、位置センサとしてモータ軸にロータリエンコーダ（テーブル移動距離換算で分解能 $2.5\mu\text{m}$ ）を備えている。図5.5にXYテーブルの外観を示す。モータの慣性モーメントは $1.47\times 10^{-4}\text{kg m}^2$ であり、X軸、Y軸の全慣性モーメント測定値（モータの慣性モーメントを含む）はそれぞれ $1.98\times 10^{-4}\text{kg m}^2$ 、 $3.26\times 10^{-4}\text{kg m}^2$ である。また、コントローラのサンプリング時間は1msである。以下では、このXYテーブルを半径25mmの円に沿って軌跡制御する実験を行う。

まず、提案したサーボ系による高精度化の効果を確認する。図5.6(1),(2)は、図5.3の高精度化のための方策、すなわち、速度フィードフォワード、 C_b のハイゲイン化、トルクフィードフォワード、のそれぞれの方策を適当に組み合わせて行った結果である。ここでの C_b のハイゲイン化とは、 K_v の値をモータのみの慣性モーメントに適した値から実際の慣性モーメントに適した値に修正することをいう。円軌跡上の設定速度は0.05m/sであり、滑らかな指令値を得るために軌跡上での加減速を行っている。図5.6において、(a)は従来のPID制御によるもの、(b)は速度フィードフォワードのみ実施

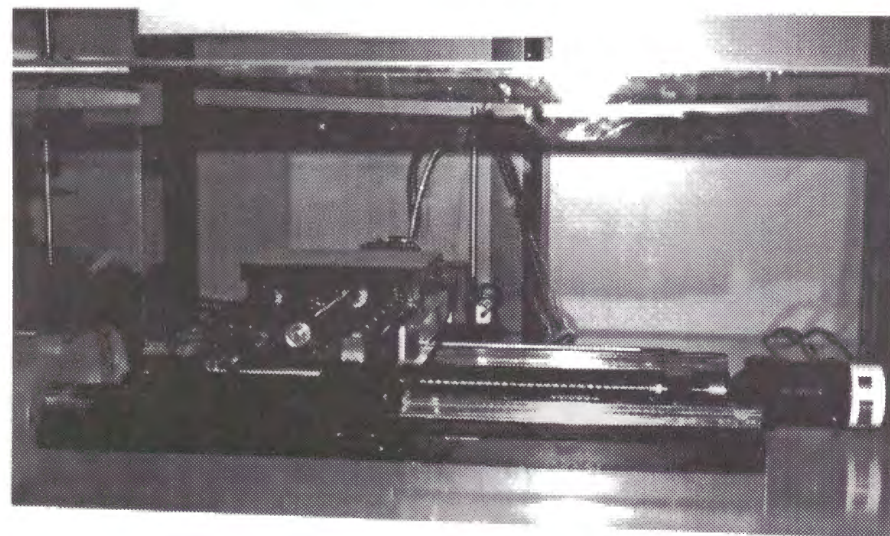
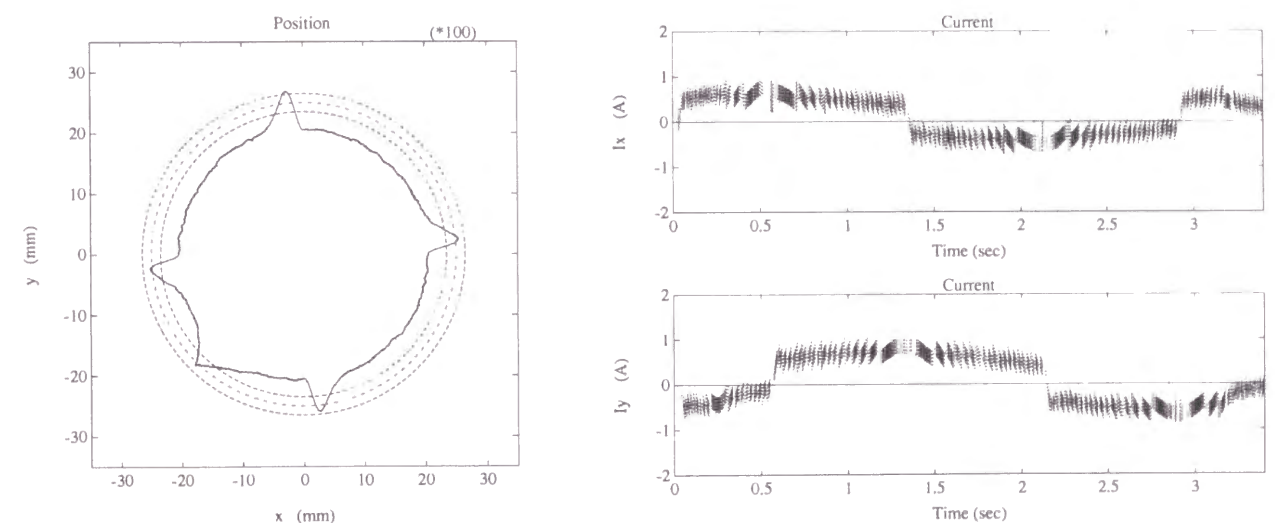


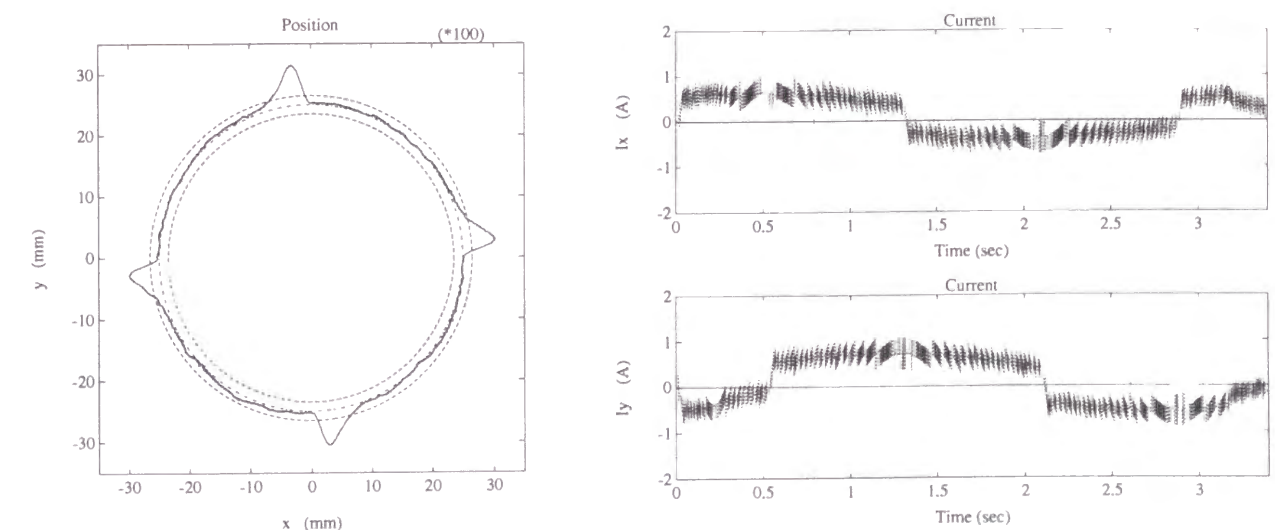
図5.5 XYテーブル

したもの、(c)は速度フィードフォワードとハイゲイン化を実施したもの、(d)は速度フィードフォワードとトルクフィードフォワードを実施したもの、(e)は3つの方策を実施したものである。図5.6の各図において、左側の図は動作軌跡、右側の上下の図のはX軸、Y軸それぞれのトルク指令値を示す。動作軌跡の図では指令値（一点鎖線）に対し誤差を100倍に拡大して動作軌跡データ（実線）を示しており、併せて誤差が $\pm 15\mu\text{m}$ の幅（破線）も表示している。また、トルク指令値の図の破線は τ_r 、実線は τ_{ff} を示す。なお、本論文ではトルクの値は相当するモータ電流値に換算し、単位A（アンペア）で示している。

図5.6(a)では円軌跡動作における半径減少や突起が顕著に現れている。一方、図5.6(b)~(e)によると各方策がそれぞれ誤差の減少に効果があることがわかり、すべてを併用した(e)の誤差が $8\mu\text{m}$ と最も小さくなる。この誤差の値は、エンコーダ分解能が $2.5\mu\text{m}$ であることを考慮すると、十分な高精度である。また、図5.6(d)(e)では、 τ_{ff} が

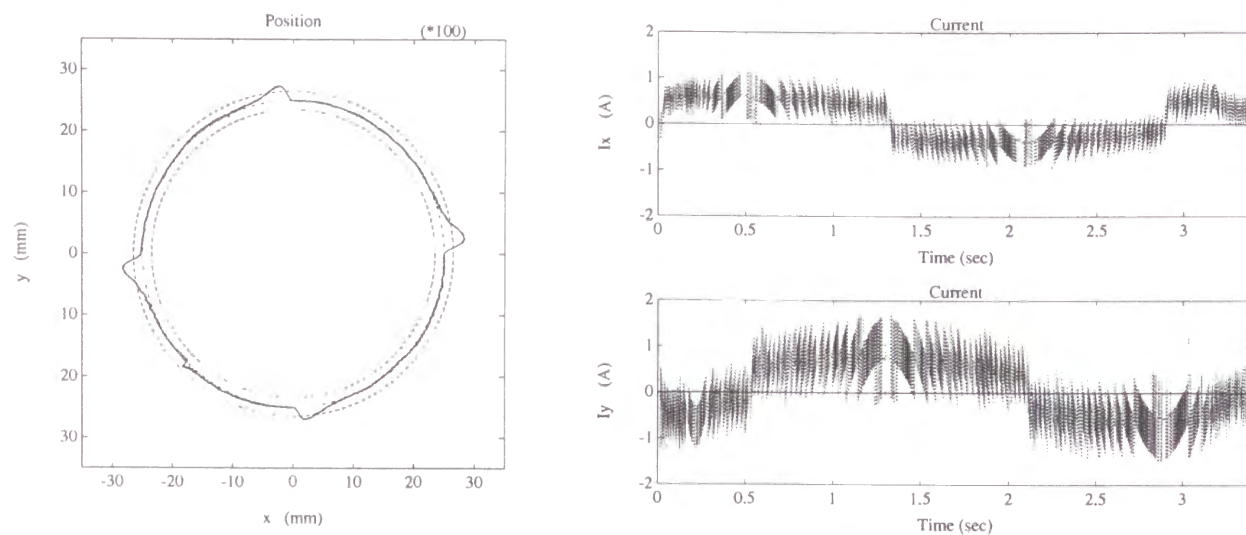


(a) 従来PID制御 (最大誤差 = $50\mu\text{m}$)

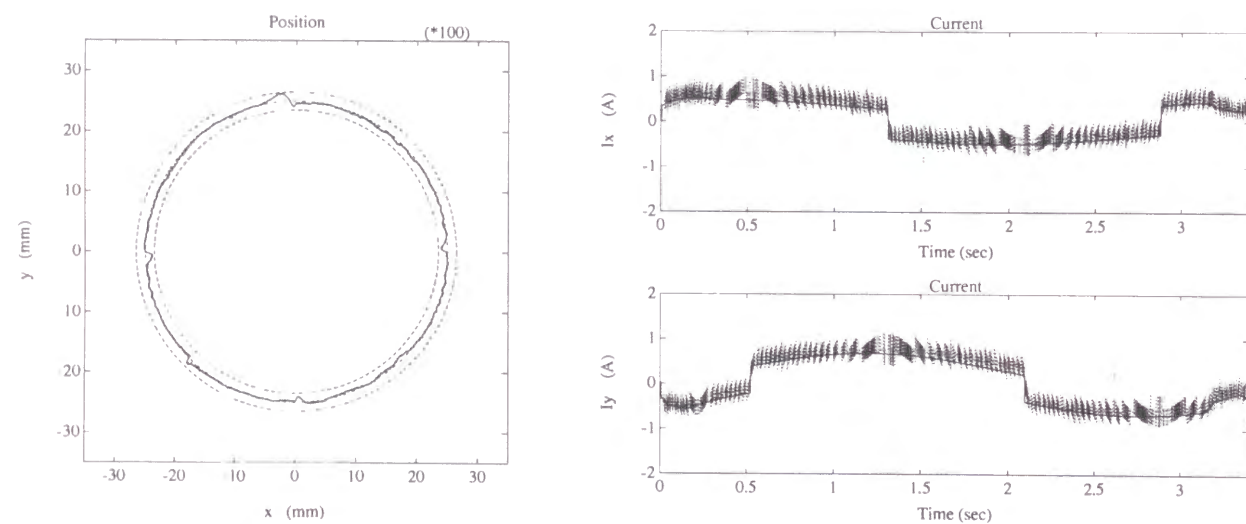


(b) 速度フィードフォワード (最大誤差 = $67\mu\text{m}$)

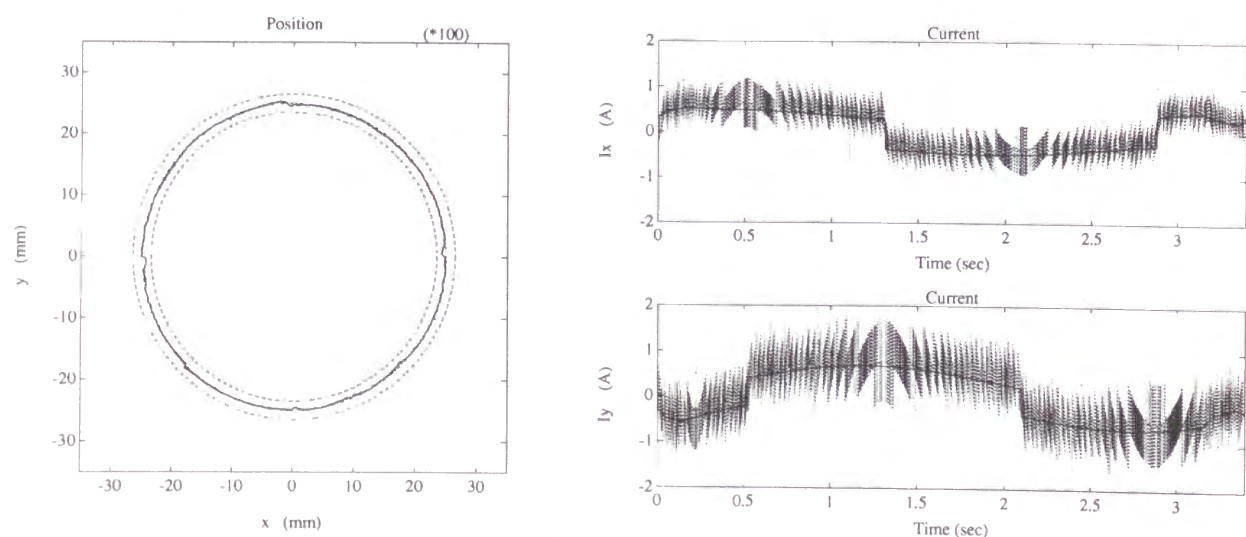
図5.6(1) 2自由度制御系の効果 1（設定速度0.05m/s）



(c) 速度フィードフォワード + ハイゲイン化 (最大誤差 = 36 μ m)



(d) 速度フィードフォワード + トルクフィードフォワード (最大誤差 = 15 μ m)



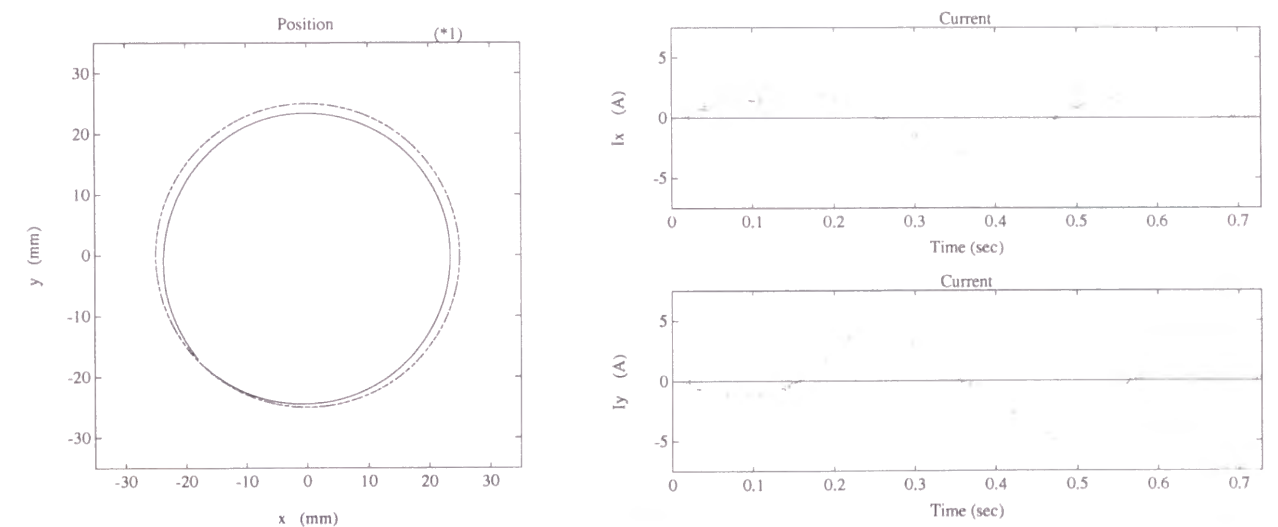
(e) 速度フィードフォワード + ハイゲイン化 + トルクフィードフォワード (最大誤差 = 8 μ m)

図5.6(2) 2自由度制御系の効果1 (設定速度0.05m/s)

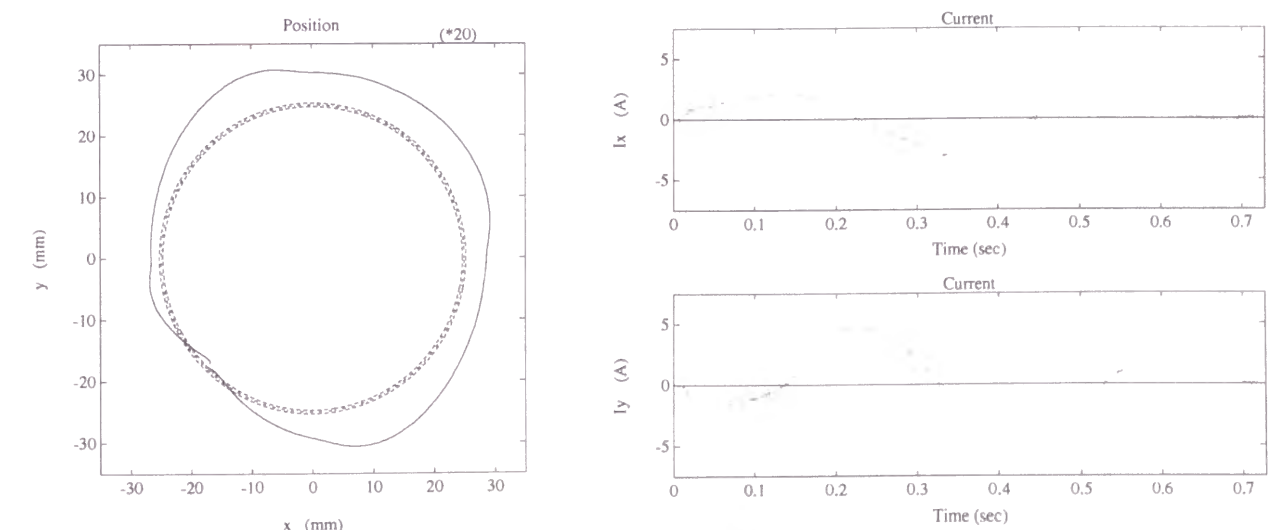
τ_r に高周波成分を除きほぼ一致している。これはトルクフィードフォワードが良好に行われて、軌跡誤差の改善が実現していることを示している。なお、 τ_r の高周波ノイズは、速度信号をエンコーダの差分で求めているための量子化の影響で生じているものである。

図5.7(1)(2)は、図5.6と同様の実験を設定速度0.33m/sで行った実験結果である。各図におけるデータは、図5.6に対応させて表示しているが、図5.7(a)(b)(c)においては、誤差の大きさが大きいので、動作軌跡の図における誤差の拡大倍率を、それぞれ1倍、20倍、20倍にしている。

図5.7では、高速動作を行わせているため、トルクフィードフォワードを行っていない(a)(b)(c)では、それぞれ1.6mm、0.35mm、0.14mmと大きな誤差が生じていることがわかる。一方、トルクフィードフォワードを行った(d)(e)では、それぞれ25 μ m、11 μ mと、設定速度0.05m/sの場合とほとんど差のない軌跡誤差が実現できている。この結果より、トルクフィードフォワードは高速動作時により顕著な効果が得られることが確

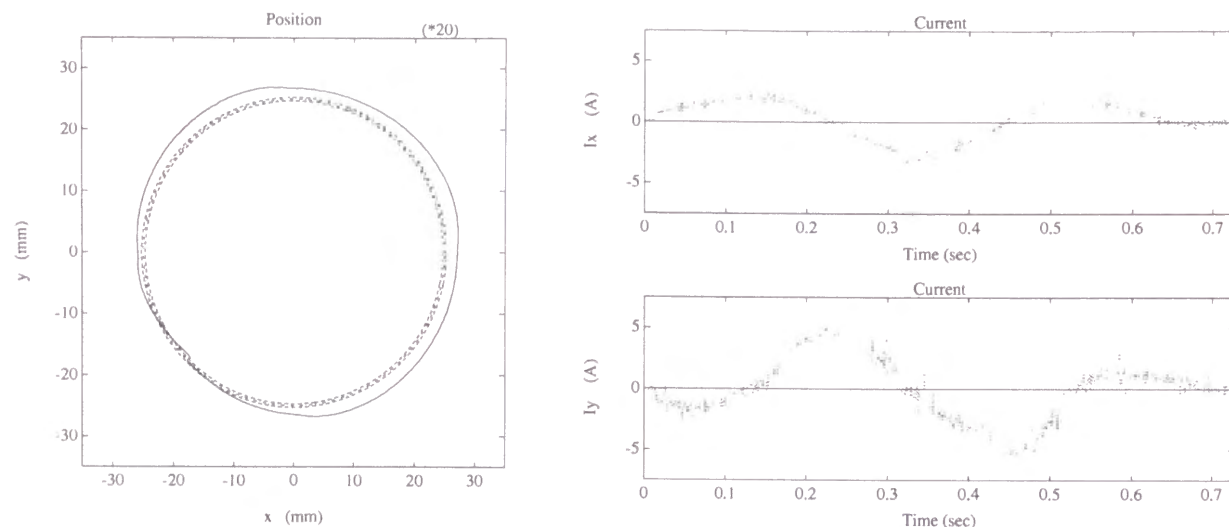


(a) 従来PID制御 (最大誤差 = 1630 μ m)

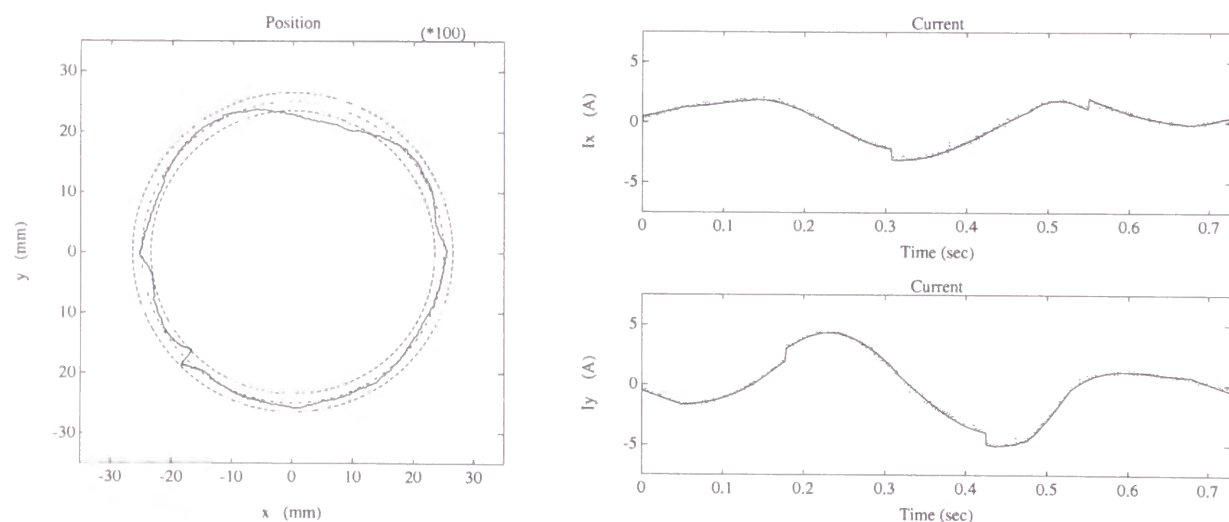


(b) 速度フィードフォワード (最大誤差 = 350 μ m)

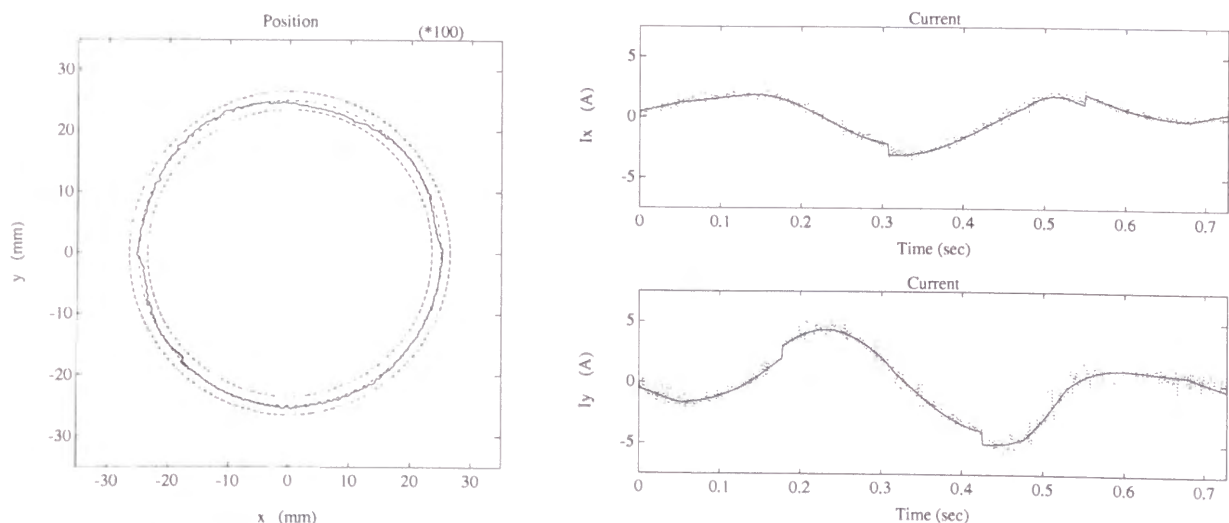
図5.7(1) 2自由度制御系の効果2 (設定速度0.33m/s)



(c) 速度フィードフォワード + ハイゲイン化 (最大誤差 = 138μm)



(d) 速度フィードフォワード + トルクフィードフォワード (最大誤差 = 25μm)



(e) 速度フィードフォワード + ハイゲイン化 + トルクフィードフォワード
(最大誤差 = 11μm)

図5.7(2) 2自由度制御系の効果2 (設定速度0.33m/s)

認できる。

以上の実験により、 P_m^{-1} 、 C_b の両方を適切に調節することにより、設定速度に関わらず高精度軌跡制御が実現できることが確認できた。

5.3.2 オートチューニング結果

前節に示した手順により設定速度0.05m/sとしてオートチューニングを行った場合の軌跡を図5.8に、各パラメータの変化の様子を図5.9に示す。図5.9においてX軸のデータをx、Y軸のデータをoで示した。 J_m の単位%は、モータロータのみの慣性モーメントを基準に計算したものである。図5.8、図5.9には初期パラメータによる試行から第5回までの結果を示している。

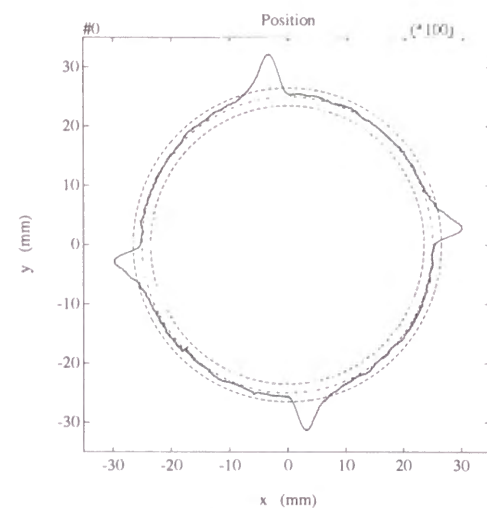
初期パラメータによる試行では、速度のフィードフォワードおよびモータロータの慣性モーメント分のみのトルクのフィードフォワードを行っており、設定速度も比較的高速でないため、動作軌跡は摩擦による誤差分を除きほぼ指令軌跡に重なっている。オートチューニングを実施することにより、各パラメータの同定値は3回目の試行ではほぼ収束値に到達しており、その結果高精度な軌跡動作が実現できた。また、オートチューニングにより得られた J_m の収束値は上述した実際値(X軸135%、Y軸222%)とほぼ等しい値となっている。

図5.10に設定速度0.33m/sでオートチューニングを行った場合の軌跡の変化を示す。この場合は、比較的高速な動作のため、初期パラメータによる試行では大きな誤差が生じる。しかし、オートチューニングを行うことで、3回目の試行では設定速度0.05m/sの場合と同等な軌跡精度が得られることが確認できた。

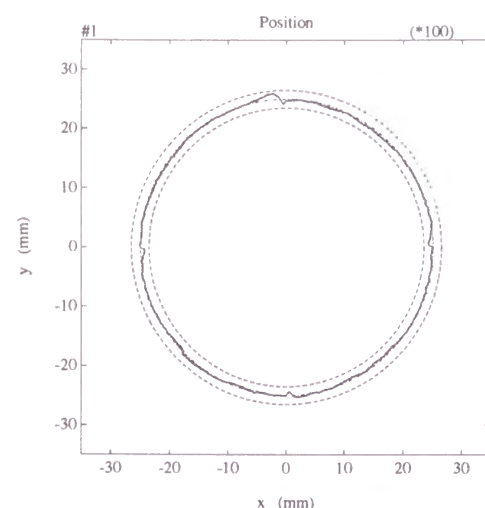
これ以外にも、指令速度、動作軌跡を変更して実験を行い、良好な結果を得ている。

5. 4 おわりに

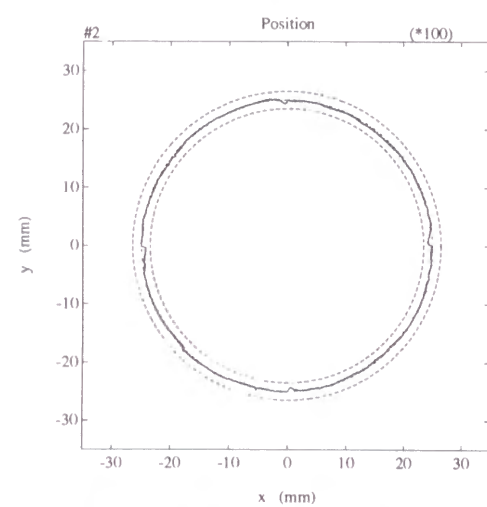
2自由度制御の考え方をもとに、高精度軌跡制御を実現するサーボ系およびそのオートチューニングを実現した。このサーボ系は従来のサーボ系で一般的なPID制御から容易に拡張できる。また、オートチューニング法は、この2自由度制御方式の構造の特長を生かしたものであり、実際の動作中のデータからチューニングが可能である。この方式をXYテーブルの軌跡制御に適用し、その有効性を確認した。なお、本章の方式は、減速比の小さいロボットなど動作中に慣性モーメントが変化する制御対象にはそのまま適用することができない。提案した方式を拡張して、このような場合への対応を実現することは、今後の課題である。



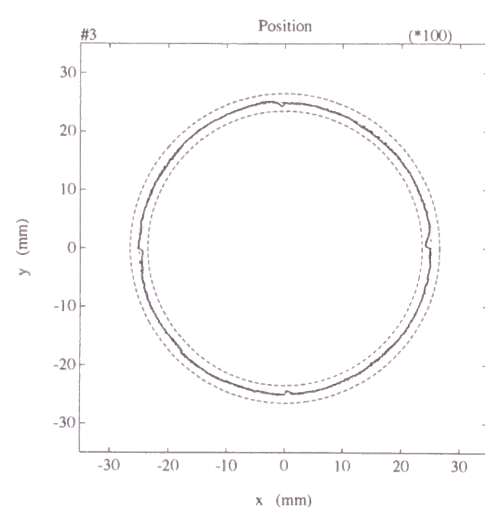
(a) 初回 (最大誤差 = 67 μ m)



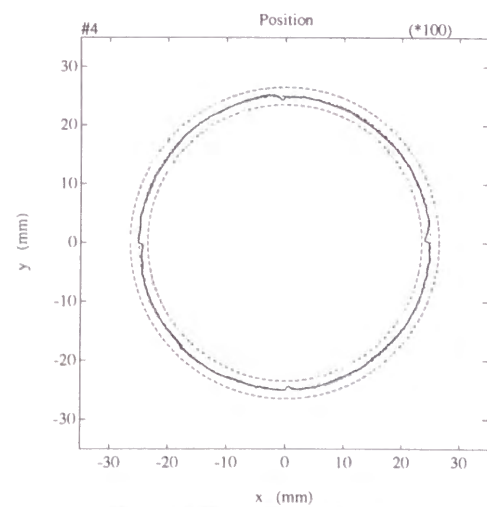
(b) 第1回目 (最大誤差 = 12 μ m)



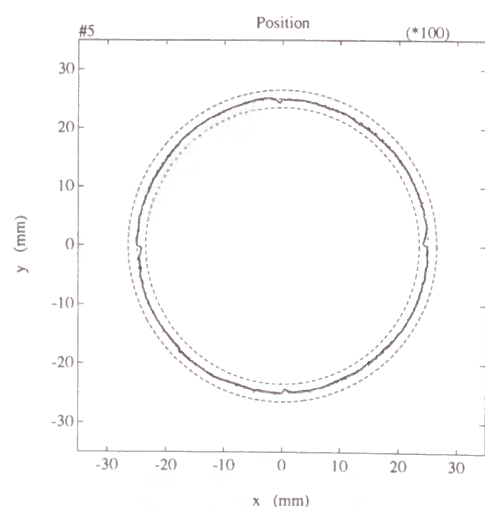
(c) 第2回目 (最大誤差 = 11 μ m)



(d) 第3回目 (最大誤差 = 11 μ m)



(e) 第4回目 (最大誤差 = 10 μ m)



(f) 第5回目 (最大誤差 = 10 μ m)

図5.8 オートチューニング結果1 [軌跡] (設定速度0.05m/s)

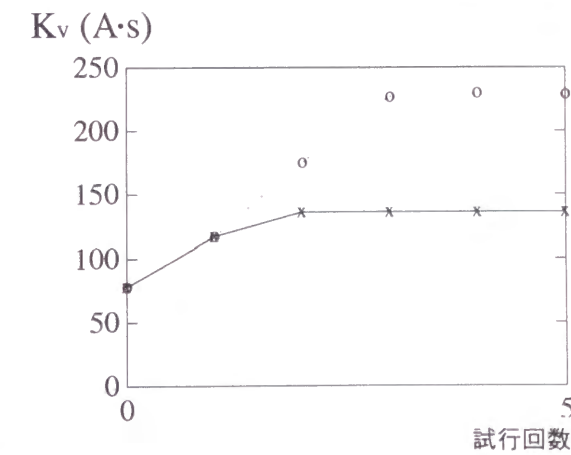
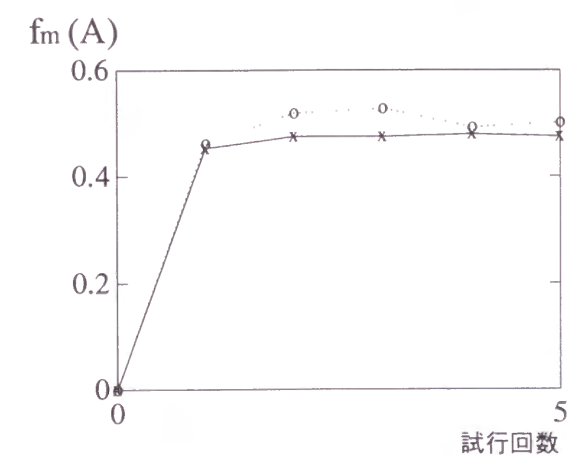
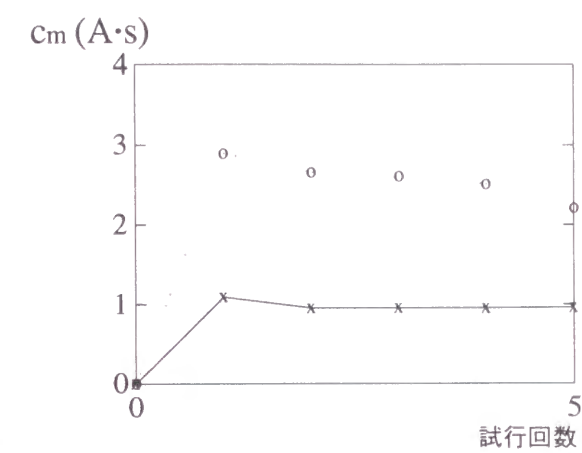
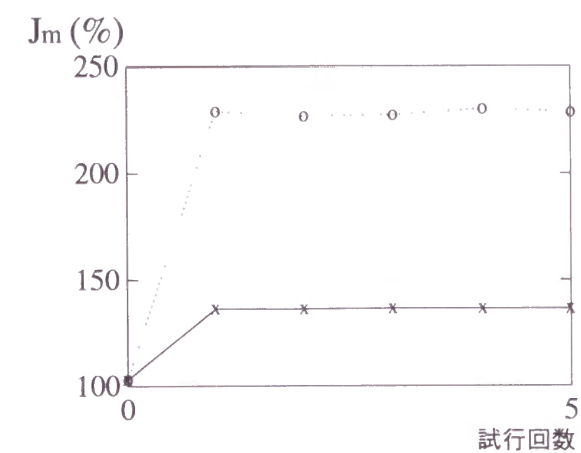


図5.9 オートチューニング結果1 [制御定数] (設定速度0.05m/s)

6. 高精度軌跡制御における 限界速度の自動設定

6. 1 はじめに

制御対象を良好に動作させるという制御系の全体としての目標を考えた場合、フィードバック／フィードフォワードの補償器の設計とともに、その制御系にどのような指令値を入力するかという点が重要になる。特に機構を制御するサーボ系では、指令値の善し悪しが制御系全体の性能を左右する場合も多い。これまでの機構制御系に対する指令値を検討した研究としては、カム曲線による加減速パターンを用いて高速位置決めを行う方式[37]などがある。この研究では機構の残留振動を軽減するカム曲線を求めているが、その加減速パターンの決定には予め機構の特性に関する情報が必要となる。

制御対象を良好に動作させるための指令値の決定を考えた場合、フィードバック／フィードフォワードの補償器を設計する場合と同様に、制御対象の特性に関する情報は不可欠である。しかし、この制御対象特性は予め明らかでない場合も多く、実際の動作中に確認しないとわからない現象も存在する。そこで、本章では、指令値生成へのオートチューニングの導入を考え、1つの具体例を実現する。

前章で述べたような機構制御系では、通常、まず目標軌跡と動作の目標仕様が与えられ、これらの情報をもとに動作速度や加減速パターンが決定される。通常、この決定は機構の特性をノウハウとして把握しているオペレータによって行われる場合が多い。指令値生成のオートチューニングを実現することにより、動作の目標仕様を陽に入力すれば、何回かの試行の後に適切な指令値が決定できる。

本章では、指令値生成のオートチューニングの1つの例として、許容誤差を満足する最大の指令速度（限界速度）を自動的に決定する方式を提案する。この方式は、前章で提案したサーボ系をベースとし、動作中のデータから誤差を評価することによって、動作速度の自動設定を行うものである。これは、動作中のデータをもとに軌跡精度の向上が図れるという前章のサーボ系の特長を生かしたものである。

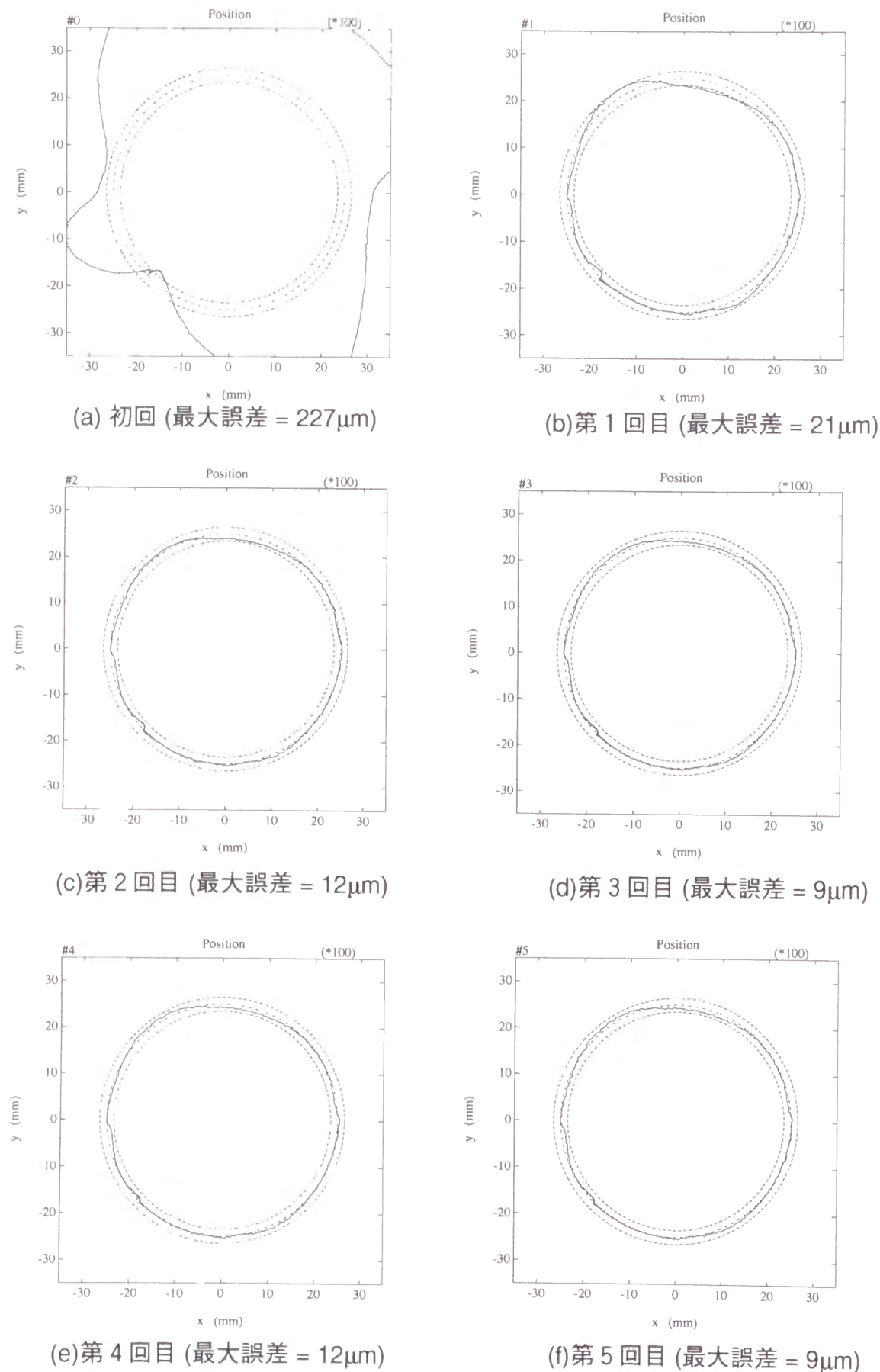


図5.10 オートチューニング結果 2 [軌跡] (設定速度0.33m/s)

6. 2 限界速度の自動設定

6.2.1 指令速度のオートチューニング

工作機械やロボットを軌跡制御する場合、軌跡誤差が許容値以下になる範囲内で、可能な限りの高速動作を実現したい場合が多い。通常、オペレータは制御対象の特性に関する知識、ノウハウをもとに、速度の設定を行っている。本章では、軌跡誤差の許容値を陽に入力することにより、誤差がその許容値以下になる限界速度を自動的に設定できるオートチューニングを実現する。

従来のメカニカルシステムにおける指令値生成の位置づけを図6.1に示す。軌跡制御における動作の仕様は、軌跡とその軌跡からのすれの許容値（許容誤差）である場合が多い。従来のメカニカルシステムの指令値生成では、通常、動作軌跡と指令速度が設定パラメータであるため、許容誤差から指令速度への翻訳作業が必要となる。一般に軌跡制御においては指令速度の増加に伴い軌跡誤差が増大するため、これまでは経験的に持つノウハウや試行錯誤により、オペレータが許容誤差から指令速度を設定している。

図6.2に本章で提案する指令値生成のオートチューニングの構成図を示す。ここで提案する指令速度のオートチューニングでは、軌跡動作ごとのデータから測定した実際の軌跡誤差と動作仕様である許容誤差とを比較し、軌跡誤差が許容誤差以下になるように指令速度を自動的に変更していく。この変更を繰り返すことにより、許容誤差を満足する限界速度を自動的に設定できる。このオートチューニングを用いることにより、軌跡と許容誤差という動作仕様をそのまま入力することで、自動的に最適な動作を行う軌跡制御が実現できる。

6.2.2 設定アルゴリズム

ここで提案するアルゴリズムは、軌跡動作の繰り返し（試行）ごとのデータをもとに、指令速度のオートチューニングと前章の高精度軌跡制御のオートチューニングを並行して行うものである。図6.3に提案する方式のブロック図を示す。図において、設定速度オートチューニング部以外の各ブロックは、図5.4の2自由度サーボ系オートチューニングのブロック図と同一である。なお、指令値生成のブロックは限界速度の自動設定に深く関わるため、詳細を示した。すなわち、指令値生成部では、動作プログラムにより軌跡とその軌跡上での速度が設定され、これらの設定値をもとに位置制御系（サーボ系）への動作指令が生成される。

設定速度のオートチューニング部では、予め設定された許容誤差と試行ごとに測定された実測誤差をもとに、制御パラメータの修正と設定速度の修正を選択して行う。すなわち、大まかに言うと、実測誤差が許容誤差よりも小さい場合には、設定速度をまだ大きくできると判断し、制御パラメータの修正とともに設定速度を大きくする。実測誤差が許容誤差よりも大きい場合には、制御パラメータの修正を行い、その修正後の試行でも誤差が改善されず実測誤差が許容誤差よりもなお大きい場合には設定速度を下げる。また、設定速度オートチューニング部では、過去の試行における実測誤差と設定速度の履歴を記憶しており、設定速度の限界を判断することができる。

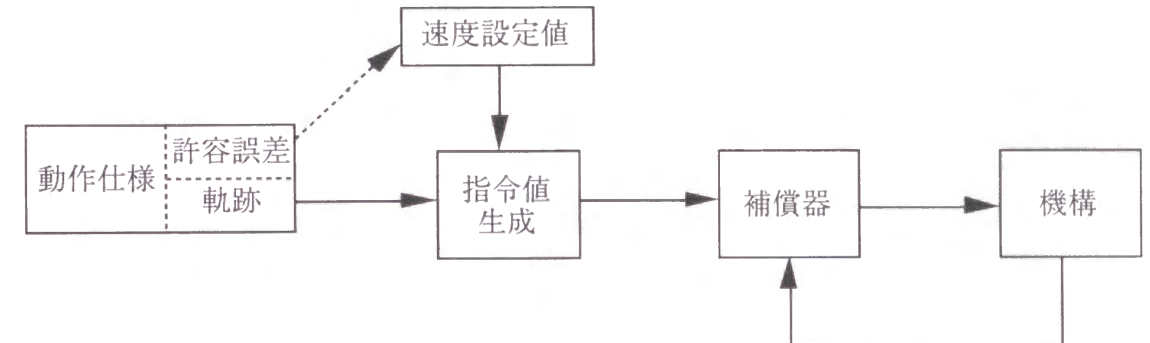


図6.1 指令値生成の位置付け（従来）

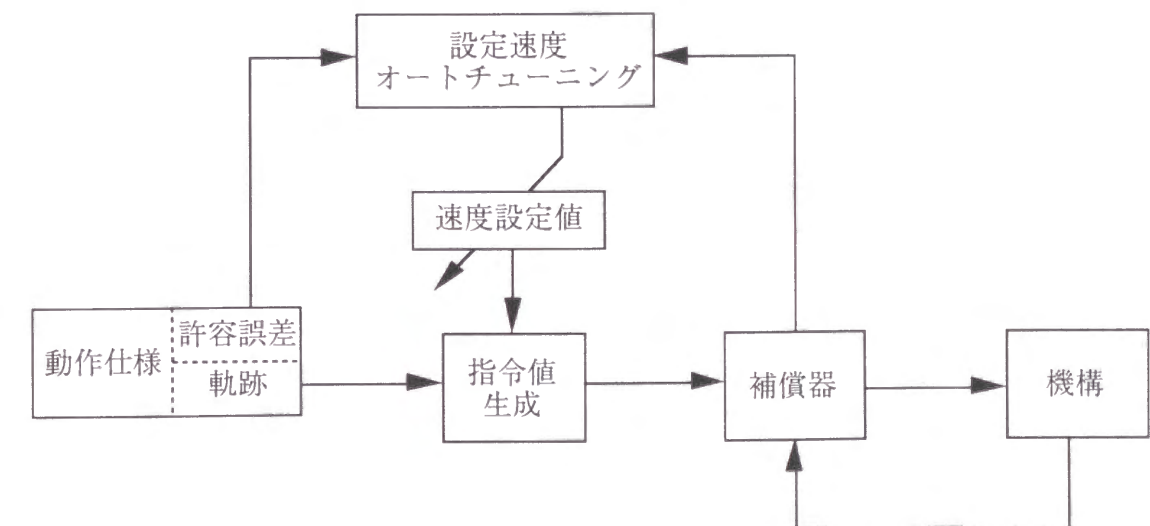


図6.2 指令値生成のオートチューニング

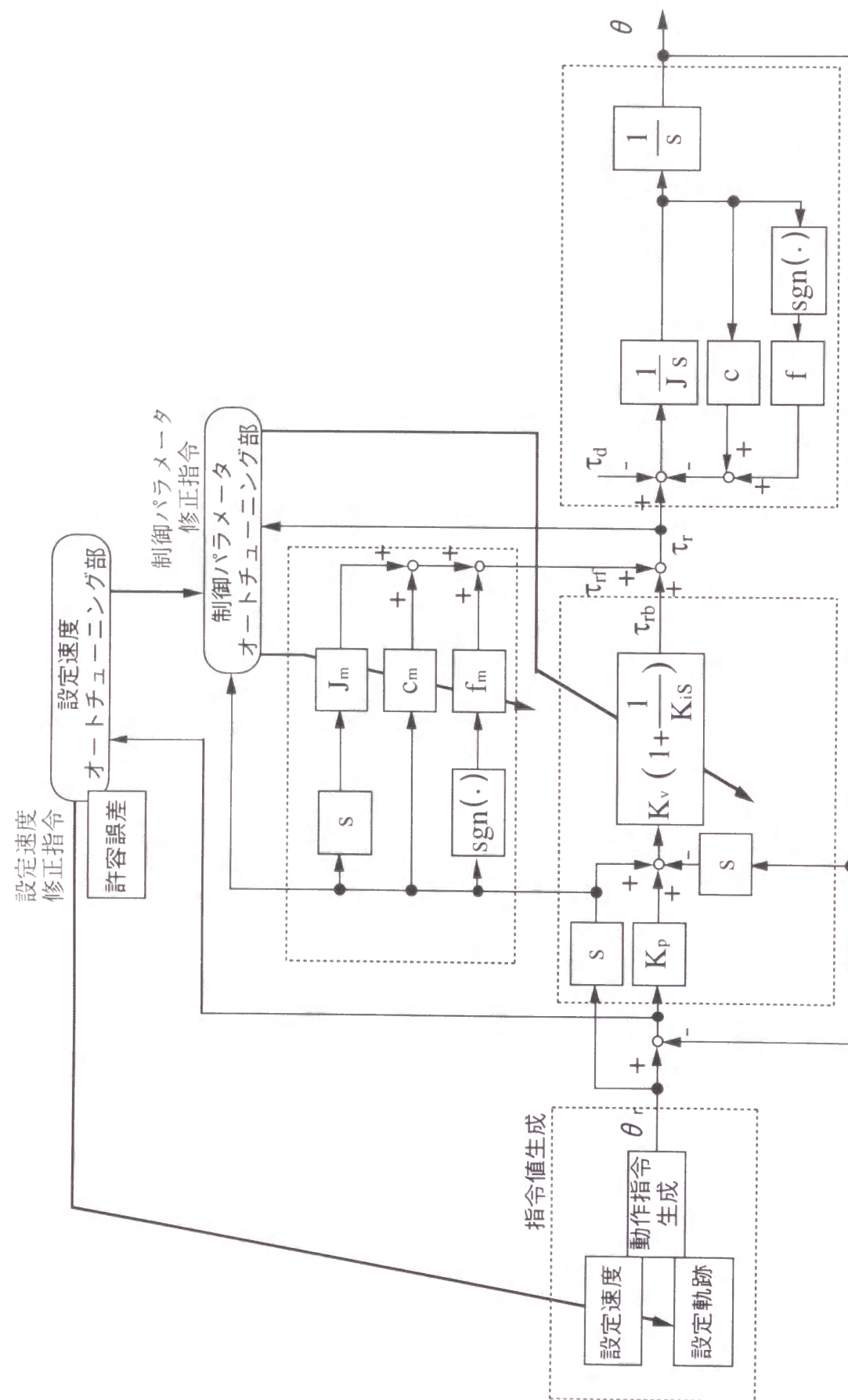


図6.3 限界速度設定のブロック図

図6.4に具体的な指令速度設定のフローチャートを示す。図において、Errmaxは許容誤差，Errは1回の試行における誤差最大値の実測値，SPは指令速度，OK，NGはSPを設定するために前回までの履歴を保存するための変数であり，OKは実測誤差が許容誤差より小さかった最大設定速度，NGは実測誤差が許容誤差より大きかった最小設定速度を示す。

まず，指令速度と制御定数の初期値，および許容誤差を設定し，軌跡動作の試行を行って，その時の誤差最大値を測定し，さらに制御定数のチューニングを行う。実測誤差が許容誤差より小さければ，次式により前回までの履歴を考慮してSPを上げる。

$$SP = \min(\sqrt{NG \cdot SP}, 1.5SP) \quad (6.1)$$

この式は，今回の速度とNGの相乗平均により次回速度を決定することを示している（ただし，急激な速度の上昇を避けるため，現在の速度の1.5倍で制限している）。

また，実測誤差が許容誤差より大きければ，現在のSPで誤差がこれ以上改善できるかどうかの判断を行う。改善の可能性があれば修正した制御定数で再度動作を行い，なければ次式によりSPを下げる。

$$SP = \sqrt{SP \cdot OK} \quad (6.2)$$

この式は，今回の速度とOKの相乗平均により次回速度を決定することを示している。最後にSPの収束の判定を行い，収束すれば誤差許容値を満足するSPが得られている。

6.3 実験結果

前節で示したアルゴリズムに従い，限界速度の自動設定の実験を行った。実験には前章の実験で用いたXYテーブル（図5.5）を用い，軌跡指令として半径25mmと半径10mmの円軌跡を用いた。

図6.5に半径25mm円軌跡における結果を示す。図6.5の(a)～(f)は，それぞれ制御パラメータである J_m ， c_m ， f_m ， K_v と，実測誤差Err，設定速度SPの各試行による値の変化を示す。誤差許容値は15 μm （図6.5(e)の図の点線）とし，指令速度の初期値を0.05m/s(図6.5(f)の図第0回)とした。初期パラメータによる試行では誤差が許容値を越えたため，次回は制御定数の修正後同じ速度で動作させる。その後第6回までの試行では誤差が許容値以下であるため，指令速度を順次増加させる。第7回の試行では誤差が許容値を越えたため，それ以後は誤差が許容範囲内に入るまで，過去の履歴をもとに指令速度を減少させる。最終的には，誤差が許容値を越えない限界近くの指令速度約0.4m/sが設定できている。

図6.6に半径10mm円軌跡における結果を示す。半径25mmの場合と同様に初期パラメータによる試行で誤差が許容値を越えた後，第6回の試行で誤差が許容値を越えている。最終的には，限界指令速度約0.27m/sが設定できている。半径25mm円軌跡の結果と比較すると限界速度が低くなっているが，同じ速度で円の半径が小さくなると加速度が大きくなることを考えると，妥当な結果といえる。

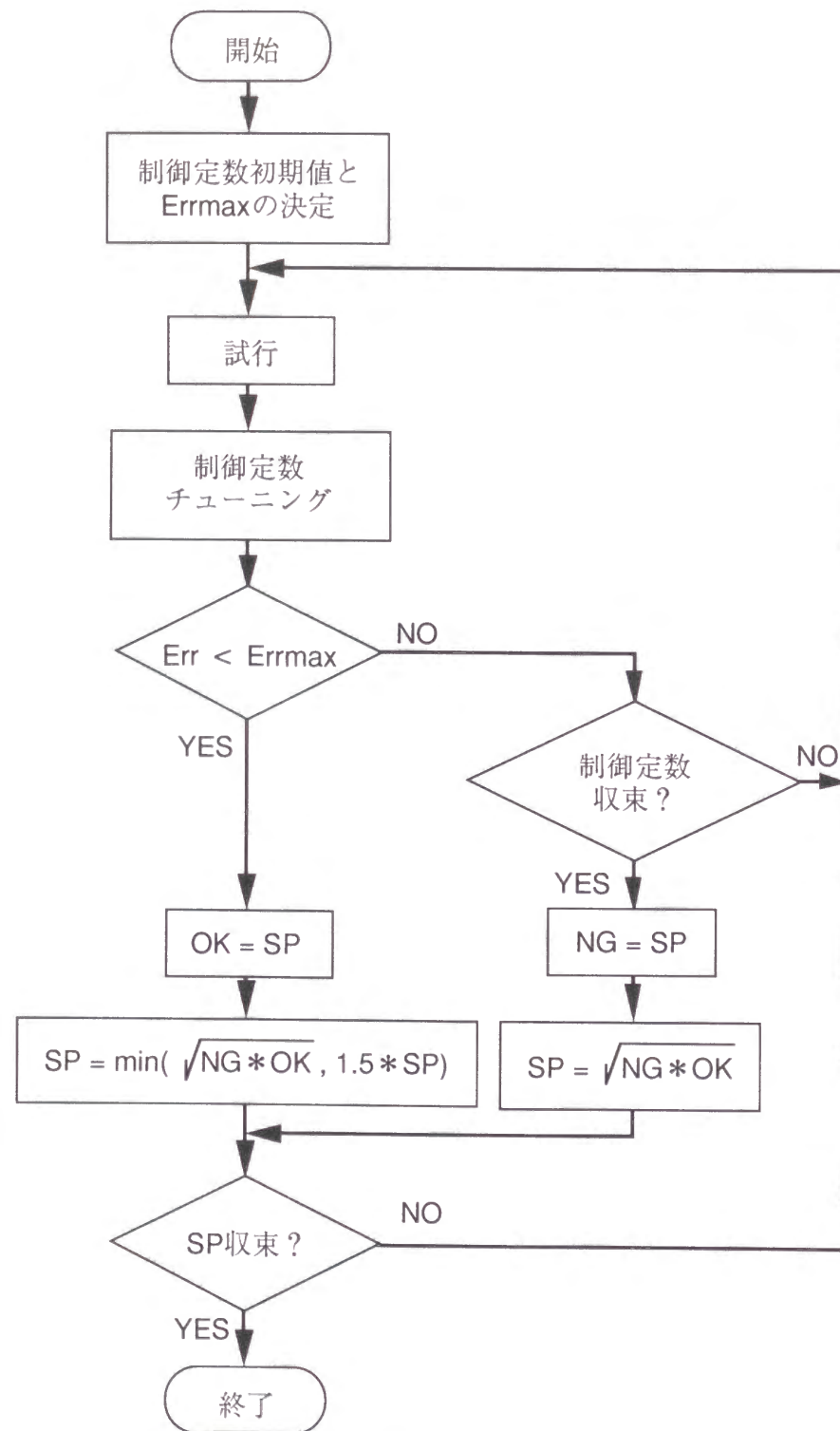


図6.4 限界速度設定アルゴリズム

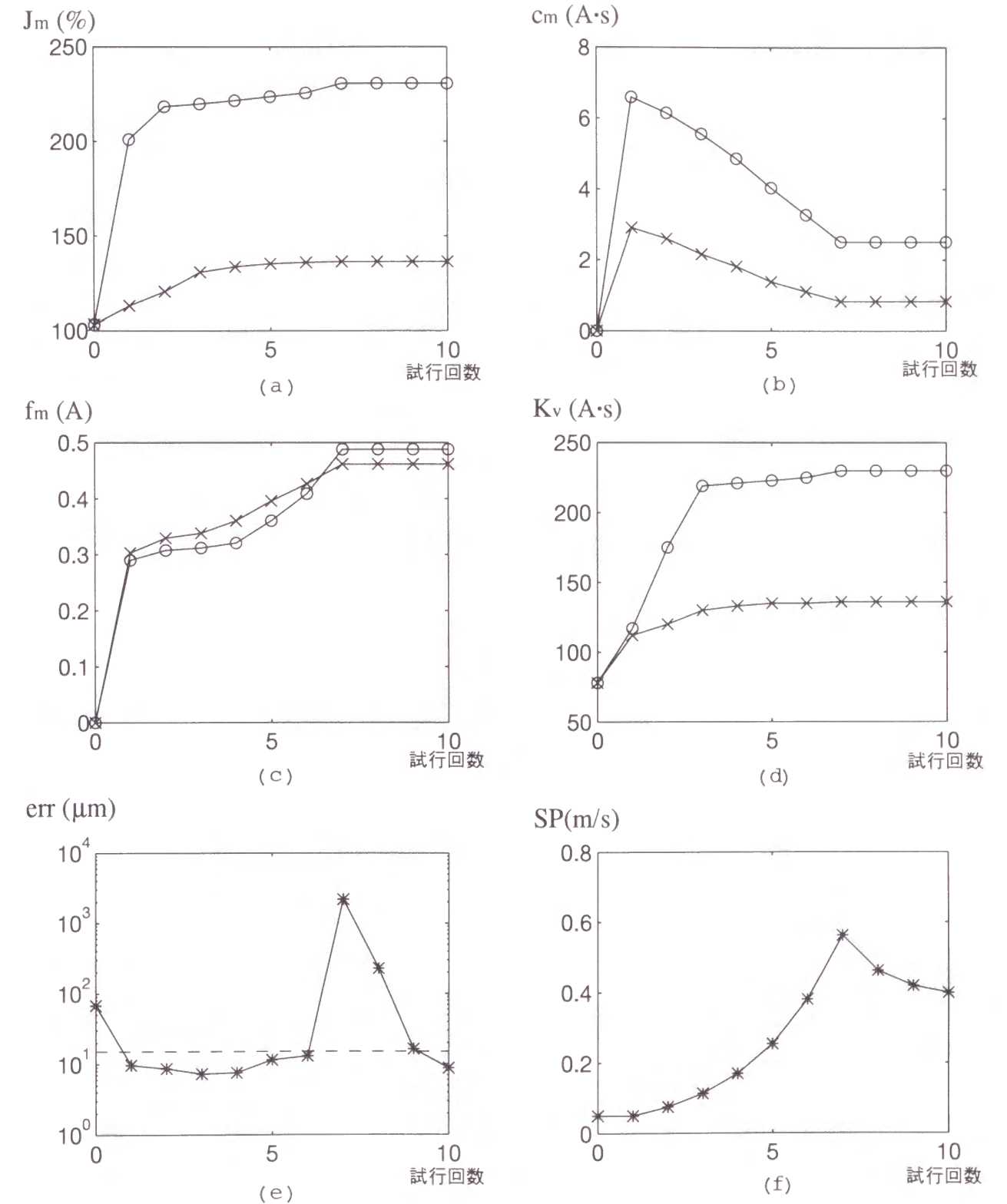


図6.5 限界速度設定の実験結果（半径25mmの円軌跡）

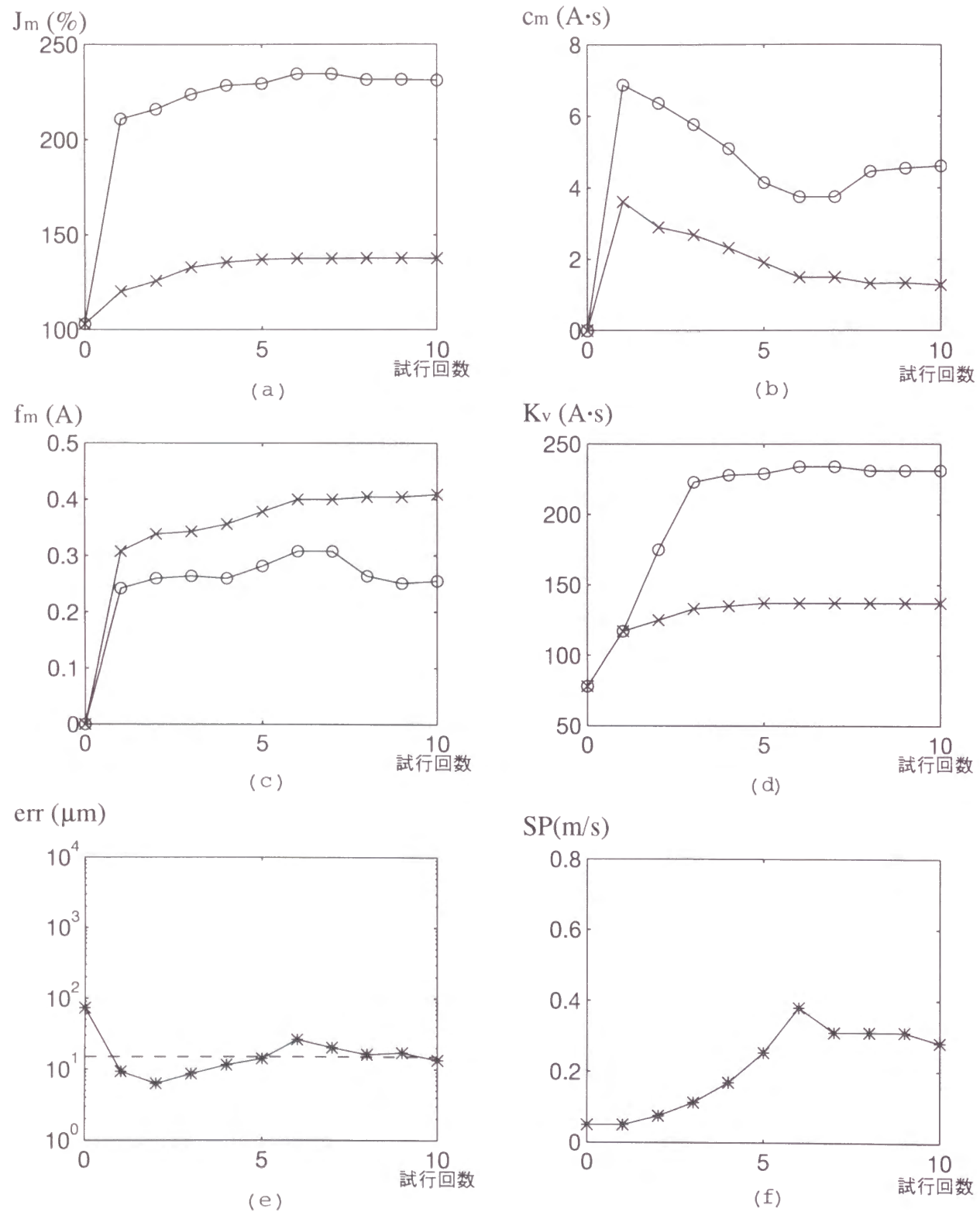


図6.6 限界速度設定の実験結果（半径10mmの円軌跡）

6. 4 おわりに

本章では，指令値生成部におけるオートチューニングについて考え，その具体例として，設定速度のオートチューニングについて述べた．前章で示した高精度軌跡制御のオートチューニングをベースに設定速度のオートチューニングを行うことで，限界速度を自動的に設定できることを実験によって示した．指令値生成部におけるオートチューニングについては，様々な展開と今後の発展が期待できる．

7. 結論

本論文では、産業システムにおけるオートチューニング方式について述べた。本論文でのオートチューニングとは、ある時間間隔のデータを解析し自動的に制御パラメータのチューニングを行うものである。このオートチューニングは、リアルタイムの計算量をほとんど増やすことなく自動パラメータ設定が可能であり、従来からあるコントローラに付加しやすいといった点から、実用的なものといえる。オートチューニングの実現により産業システムにおいて以下のような利点が得られる。

- 1) 立ち上げ時の設定作業の省力化
- 2) 適切なパラメータ設定による制御性能の向上
- 3) 作業者の熟練度に影響されない安定した制御性能の実現
- 4) 制御対象の経年変化に影響されない安定した制御性能の実現
- 5) 産業システムへの先進的制御方式導入の容易化

本論文では、汎用的なコントローラとして用いられるプラント制御用PIDコントローラと機構制御用サーボコントローラを主な対象として、実用的なオートチューニングを考えた。

各章における具体的な内容と結果は以下の通りである。

第2章では、制御対象のクラス分けを用いたファジィオートチューニング方式を提案し、従来のファジィ推論によるオートチューニング方式では不明確であった適用可能な制御対象の範囲の明確化と拡大を実現した。プラント用PID制御を対象として、シミュレーションと実験により有効性を確認した。

第3章では、ファジィ推論による同定法を提案した。この方式を用いたオートチューニングにより、閉ループ系の応答を確認しながらチューニングが行えるというファジィオートチューニングの特長を保ったまま、より一般的な制御系設計方式が実現できた。1次遅れ+むだ時間系における1次遅れ時定数・むだ時間の大きさ・プラントゲインの同定、およびモータ制御系の慣性モーメントの同定についてシミュレーションまたは実験を行い、その有効性を示した。

第4章では、オペレータノウハウを利用したオートチューニング方式を提案した。この方式により、従来の制御系設計にもとづくオートチューニング方式において、オペレータのノウハウを組み込むことが実現できた。具体例として、機械振動が生じた

場合のフィードバックパラメータの制限について、実験による検証を行った。

第5章では、高精度軌跡制御のための2自由度サーボ系とそのオートチューニングについて述べた。このオートチューニング方式は、2自由度サーボ系という新しい構造を持つ制御系に対し、その構造上の特徴を利用してオートチューニングを行う。非線形要素である摩擦の大きさまで考慮した制御系に対する実験を行い、高精度な軌跡制御を実現した。

第6章では、高精度軌跡制御における限界速度の自動設定について述べた。これは、指令値生成部におけるオートチューニングの具体例であり、第5章の高精度軌跡制御のオートチューニングをベースに、指定誤差範囲を満足する設定速度を繰り返し動作により自動的に設定するものである。高精度軌跡制御における実験結果により有効性を確認した。

ここで提案した方式の一部は実際の産業システムに搭載され、稼動している。これらの提案により、緒論で述べた以下の項目への対応が実現できたと考えている。

- 1) 適用可能な制御対象の範囲の明確化と拡大
- 2) 動作中の（閉ループ制御中）データをもとにしたオートチューニング
- 3) モデル化の困難な制御対象特性に対する対応の実現
- 4) 新しい制御方式に対するオートチューニングの実現
- 5) オートチューニングの考え方の指令値生成部への拡大

今後の課題としては、以下のようなものがあげられる。

・ゲインスケジューリング的手法へのオートチューニングの適応

本論文で述べたオートチューニングは、ある時間間隔のデータを解析し制御パラメータの修正を行うものであるため、例えばロボットの姿勢による慣性モーメント変動のように特性変動のある制御対象にリアルタイムに適応していくことは困難である。そこで、計算量をほとんど増やすことなく従来からあるコントローラにも付加しやすいというオートチューニングの特徴を保持したまま特性変動のある制御対象に対応する方式として、状態に応じてコントローラ、あるいは制御パラメータを切り換えるゲインスケジューリング的手法へのオートチューニングの適用が有効になる。

・新しい制御方式のオートチューニングにおけるモデル化困難な特性に対する対応

第5章で提案した2自由度サーボ系のオートチューニングは、制御系の性能を向上させた上でパラメータのチューニングまで自動的に行える有効な方式である。しかし、基本的には時間周波数データにもとづく間接調整法（表1.1の領域4）であり、モデル化困難な制御対象特性への対応はこのままでは難しい。そこで、第4章で提案したオペレータノウハウを利用する方式と融合させることにより、より実用的なオートチューニングが実現できると考えている。

・指令値生成部のオートチューニングへの適用の拡大

特にサーボコントローラにおけるオートチューニングへの指令値生成部への適用を発展させていくことが必要である。サーボコントローラにおける指令値生成部は、制御対象によって様々な制約があり一般化することが難しい面も大きい。しかし、一般にこれまでの研究が指令値追従／外乱抑制の性能改善に注力されてきたために、今後は指令値生成部の改善が制御性能向上に寄与する割合が大きいと考えられる。制御対象の特性も含んだ情報から指令値生成部を修正していくオートチューニング方式は、産業界でも有用な方法であり、この分野の研究が有効である。

参考文献

- [1] I. D. Landau, 富塚：適応制御システムの理論と実際, オーム社 (1981)
- [2] 大久保：チューニングの現状, 計測と制御, Vol. 25, No. 9, 62-69 (1986)
- [3] 森, 森田：セルフチューニングコントローラ, コンピューtrol, Vol. 22, 117-135 (1988)
- [4] 森, 重政：PIDオートチューニングコントローラの動向, 計測と制御, Vol. 29, No. 8, 723-728 (1990)
- [5] 山本, 大松, 石原：セルフチューニングPID制御系の一設計, 計測自動制御学会論文集, Vol. 25, No. 10, 1069-1075 (1989)
- [6] Y. Nishikawa, N. Sannomiya, T. Ohta & H. Tanaka: A Method for Auto-Tuning of PID Control Parameters, Automatica, Vol.20, No.3, 321-332 (1984)
- [7] 重政, 市川：デジタルプロセス制御系の閉ループ形オートチューニング方法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 20, No. 7, 592-599 (1984)
- [8] 重政, 飯野, 神田：2自由度PIDコントローラのオートチューニング方法, 計測と制御, Vol. 27, No. 4, 305-311 (1988)
- [9] B. Porter, A. H. Jones and C. B. McKeown: Real-time expert tuners for PI controllers, IEE Proc., Vol. 134, No. 4, 260-263 (1987)
- [10] J. Lieslehto, J. T. Tantt and H. N. Koivo: An Expert System for Tuning PID Controller, Proc. 1988 ACC, Vol. 1, 1905-1906 (1991)
- [11] J. Litt: An Expert System to Perform On-Line Controller Tuning, IEEE Control Systems, Vol. 11, No. 3, 18-23 (1991)
- [12] 野本, 近藤：ファジィ・オートチューニング・コントローラ, 第3回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 117-120 (1987)
- [13] 野本, 近藤：再帰型ファジィ推論を用いたオートチューニング・コントローラ, 計測自動制御学会論文集, Vol. 25, No. 10, 1126-1133 (1989)

- [14] S. Chand: On-line, Self-Monitoring Tuner for Proportional Integral Derivative Controllers, Proc. 30th CDC, Vol. 1, 261-262 (1988)
- [15] 斎藤, 川上, 松本, 高橋, 立花, 末広: ファジィ推論を応用したPIDコントローラ用オートチューニング方式, 第13回システムシンポジウム, 65-69 (1989)
- [16] 野村, 斎藤, 横川, 高橋, 菅野: ファジィ推論を応用したPIDコントローラ用オートチューニングシステム, 日立評論, Vol. 71, No. 8, 815-822 (1989)
- [17] J. D. Ziegler and N. B. Nichols: Optimum Settings for Automatic Controllers; ASME Trans., Vol. 64, No. 8, 759-768 (1942)
- [18] 北森: PID制御システムの設計論, 計測と制御, Vol. 19, No. 4, 382-391 (1980)
- [19] 斉藤, 田中: モータ位置制御系のゲイン調整方法, OMRON TECHNICS, Vol. 29, No. 4, 380-393 (1989)
- [20] 白木: ロボットのゲイン調整, ファジィ学会誌, Vol. 3, No. 2, 186-187 (1991)
- [21] H. C. Tseng, and V. H. Hwang: Servocontroller Tuning with Fuzzy Logic, IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 1, No. 4, 262-269 (1993)
- [22] 海田: ACドライブのオートチューニング技術, 平成4年電気学会産業応用部門全国大会, S. 1-7, S.23-S. 26 (1992)
- [23] 栗屋, 加藤, 三宅, 伊藤: 外乱推定に基づいたサーボ系の慣性項推定法とオートチューニング, 日本機械学会論文集C編, Vol. 58, No. 549, 1371-1376 (1992)
- [24] 栗屋, 加藤, 三宅, 伊藤: 外乱推定成分の直交関係を利用したイナーシャ同定法, 日本機械学会論文集C編, Vol. 58, No. 555, 3208-3214 (1992)
- [25] 佐藤, 松井: 負荷トルクオブザーバを用いたイナーシャ推定法, 電気学会論文誌D, Vol. 112, No. 2, 181-182 (1992)
- [26] 山田, 吉田, 伊達: 負荷トルクオブザーバを用いたイナーシャ推定の一方法, 電気学会論文誌D, Vol. 113, No. 2, 263-264 (1993)
- [27] J. Oaki, S. Adachi and T. Sigemasa: A New Servo Parameter Tuning System for Industrial Robots, 1990 JAPAN-U. S. A. Symposium on Flexible Automation, Vol. 1, 53-58 (1990)
- [28] 大明, 足立: 産業用ロボットのデジタルサーボチューニングシステム; 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 1, 55-64 (1991)
- [29] Y. Koren and C. C. Lo: Advanced Controllers for Feed Drives, Annals of CIRP, Vol. 41/2/1992, 689-698 (1992)
- [30] A. Suzuki, and M. Tomizuka: Design and Implementation of Digital Servo Controller for High Speed Machine Tools, Proc. of the 1991 American Control Conference, 1246-1251 (1991)

- [31] 是田, 仲友, 津村, 津田, 渡部: 修正逆伝達関数制御による工作機械の送りの高速化に関する研究, 精密工学会誌, Vol. 59, No. 8, 1347-1352 (1993)
- [32] 安野, 鈴木, 鎌野, 原田, 片岡: 適応制御を用いた2自由度速度および位置サーボシステムの設計と応答, 電気学会研究会, IIC-93-16, 79-88 (1993)
- [33] 山田: オブザーバによるサーボモータ系の固体摩擦の推定と位置決め制御への応用, 計測自動制御学会論文集, Vol. 24, No. 2, 162-169 (1988)
- [34] 栗屋, 加藤, 三宅, 伊藤: 外乱オブザーバを利用した非線形摩擦のトルクバイアス補償法, 日本機械学会論文集C編, Vol. 57, No. 534, 371-376 (1991)
- [35] 栗屋, 加藤, 太田, 三宅, 伊藤: クーロン摩擦が作用する機械運動系のパラメータ同定法, 日本機械学会論文集C編, Vol. 59, No. 567, 3342-3348 (1993)
- [36] 大明・足立: ロボットアームの周波数応答と物理パラメータの同時同定法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 26, No. 12, 1461-1463 (1990)
- [37] 神崎, 鈴木, 川崎: 直流サーボモータによるカム曲線の出力 (第3報), 精密工学会誌, Vol. 59, No. 1, 107-112 (1993)
- [38] 石岡, 竹垣, 大井: プロセスダイナミクスの知識ベース型モデリング, システム制御情報学会論文誌, Vol. 2, No. 1, 1-9 (1989)
- [39] 北森: 制御対象の部分的知識に基づく制御系の設計法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 15, No. 4, 549-555 (1979)
- [40] 相良, 秋月, 中溝, 片山: システム同定, 計測自動制御学会 (1981)
- [41] 竹垣, 石岡: 知的制御システム, 海文堂 (1990)
- [42] G. N. Saridis: On the Theory of Intelligent Machines: A Survey, Proc. of the 27th CDC, 1799-1804 (1988)
- [43] 垣野, 井原, 中津, 篠原: NC工作機械の運動精度に関する研究 (第6報), 精密工学会誌, Vol. 56, No. 4, 739-744 (1990)
- [44] 前田, 杉江: アドバンスト制御のためのシステム制御理論, 朝倉書店, 56-72 (1990)

謝辞

本論文は、著者が三菱電機株式会社産業システム研究所において行ってきた研究を、京都大学工学研究科教授 杉江俊治先生のご指導のもとにまとめたものです。杉江俊治先生には、研究内容への示唆に富んだご教示のみならず、折に触れ本研究をまとめることへの温かい励ましを頂きました。心より感謝の意を表します。

京都大学工学研究科教授 足立紀彦先生、片山徹先生には、貴重なお時間をお割き頂き、有益なご助言を頂きました。謹んで感謝の意を表します。

京都大学名誉教授 花房秀郎先生、京都大学工学研究科教授 吉川恒夫先生には、著者の学生としての研究開始以来、多岐にわたる様々なご教示を頂きました。さらに、吉川恒夫先生には、本研究をまとめるにあたっても多大なご指導とご尽力を頂きました。心より御礼申し上げます。

本論文をまとめる機会と温かい激励のお言葉を頂きました三菱電機株式会社産業システム研究所所長 中堀一郎博士、同研究所FAシステム開発部部長 吉田利夫氏に深く感謝の意を表します。また、長年に渡りご指導頂き、本研究を温かく見守って頂いた三菱電機株式会社産業システム研究所技師長 渡辺光人氏、同研究所主管技師長丸山寿一氏、名古屋製作所開発部部長 大島道隆氏に感謝の意を表します。

三菱電機株式会社名古屋製作所NCシステム部NCシステム第一課課長 森田温氏には、本研究開始当初から、熱心なご指導、ご討議、ご指摘を頂きました。本研究は全般に渡り森田温氏の多大なご尽力によるものです。心より御礼申し上げます。また、産業システム研究所FAシステム開発部第2グループ 佐藤智典氏には、共に研究を進め多大な貢献を頂きました。改めて御礼申し上げます。さらに、同グループ員の方々には様々な示唆に富んだご討論、ご指摘を頂きました。深く感謝の意を表します。

最後に、著者の研究生活を見守ってくれた亡父守男、母芳子、論文を推敲してくれた妻直子に感謝の意を表します。

研究発表

発表論文

- 1 吉川, 岩崎: 分散制御系の固定モードの存在条件—サブシステムの状態が観測できる場合—, 計測自動制御学会論文集, 20-4, 361-363 (1984)
- 2 関口, 岩崎, 播磨: 回転4軸型クリーンロボットの開発, 精密工学会誌, 56-4, 655-660 (1990)
- 3 岩崎, 森田, 丸山: ファジィ推論による制御対象の同定とオートチューニングへの応用, 日本機械学会論文集 (C編), 58巻, 554号, 2997-3002 (1992)
- 4 岩崎, 森田, 丸山: 制御対象のクラス分けを付加したファジィオートチューニング, 日本ファジィ学会誌, Vol.5, No.3, 639-649 (1993)
- 5 岩崎, 佐藤, 森田, 丸山: 高精度軌跡制御のための2自由度サーボ系における制御定数と限界速度の自動設定, 日本機械学会論文集 (C編), 60巻, 574号, 2023-2028 (1994)
- 6 T. Iwasaki, A. Morita and H. Maruyama: Plant Identification with Fuzzy Inference and its Application to Auto-Tuning, JSME International Journal, Series C: Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing, Vol 38, No.3, 457-462 September (1994)
- 7 T. Iwasaki, T. Sato, A. Morita and H. Maruyama: Auto-Tuning of Two-Degree-of-Freedom Motor Control for High-Accuracy Trajectory Motion, Control Engineering Practice, Vol. 4, No. 4, 537-544 (1996)

国際会議講演

- 1 M. Takeshita, H. Sekiguchi, T. Iwasaki and T. Harima: Development of Direct Drive Robot, Proc. of the 15th ISIR, 463-470 (1985)
- 2 T. Bamba, N. Kodaira, M. Fujita, T. Iwasaki, A. Satake and H. Maruyama: An Advanced Robot Controller for Real-Time Sensory Feedback, Proc. Int. Workshop on Industrial Automation Systems, 17-22 (1987)

- 3 H. Sekiguchi, T. Iwasaki and T. Harima : Development of a Super Clean Room Robot Using a Parallelogram Arm Mechanism with Magnetic Fluid Seal, Proc. of ISMCR'90 (1990)
- 4 T. Iwasaki and A. Morita : Fuzzy Auto-Tuning for PID Controller with Model Classification, Proc. of NAFIPS'90, 90-93 (1990)
- 5 T. Iwasaki and A. Morita : Auto-Tuning Controller with Fuzzy Identification, Proc. of the Int. Conf. on Fuzzy Logic & Neural Networks, 401-404 (1990)
- 6 T. Iwasaki and A. Morita : Fuzzy Auto-Tuning Method with Hierarchical Operations and its Application to Motor Control, Proc. of IFES'91, 780-787 (1991)
- 7 T. Iwasaki and T. Sato : Two-Degree-of-Freedom Motor Control for High Accuracy Trajectory Motion and its Auto-Tuning of Control Parameters and Maximum Allowable Velocity, Proc. of AMC'94, 951-959 (1994)
- 8 H. Makita, T. Iwasaki and T. Bamba : Reference Generation for Servo-motors with Cam Motion Curve and Auto-tuning of its Generating Parameter, Proc. of ICARCV'94, 73-77 (1994)
- 9 K. Maekawa, A. Morita and T. Iwasaki : Control System Design Automation for Mechanical System, Proc. of AMC'96, 547-552 (1996)
- 10 K. Maekawa, T. Sugie, T. Ericsson, A. Morita and T. Iwasaki : Control System Design Automation, Proc. of the 1996 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design, 321-326 (1996)

国内技術講演

- 1 吉川, 岩崎 : 分散制御系に対する極配置アルゴリズム, システムと制御講演会 (1983)
- 2 竹下, 関口, 岩崎 : ダイレクトドライブマニピュレータの解析, 昭和59年精密工学会講演論文集, 703 (1984)
- 3 関口, 竹下, 岩崎, 播磨 : スカラ型ダイレクトドライブロボットの特性検討, 昭和61年精密工学会春季大会講演論文集, 567-568 (1986)
- 4 岩崎, 竹下, 関口, 播磨 : ダイレクトドライブロボットの関節間の相互干渉, 第4回日本ロボット学会学術講演会論文集, 527-528 (1986)
- 5 関口, 岩崎, 播磨 : 回転4軸型クリーンロボットの開発, 昭和63年精密工学会関西地方定期学術講演会論文集, 55-56 (1988)
- 6 岩崎, 関口 : 回転4軸型クリーンロボットの性能評価, 昭和63年精密工学会秋季大会講演論文集, 885-886 (1988)

- 7 岩崎, 森田 : モデル分類型ファジィオートチューニングコントローラ, 第32回自動制御連合講演会, 267-268 (1989)
- 8 岩崎, 森田 : プラント用PIDコントローラのファジィオートチューニング, 平成3年電気学会全国大会シンポジウム, S.10-5, S.10-15-S.10-18(1991)
- 9 岩崎, 森田 : ファジィ推論による制御対象の同定とオートチューニングへの応用, 機械学会D&Dコンファレンス (1991)
- 10 岩崎, 森田 : ファジィ推論による同定法を用いたサーボ系のオートチューニング, 第3回インテリジェントFAシンポジウム前刷, 95-98 (1991)
- 11 岩崎, 森田 : オペレータノウハウを考慮したサーボ系のオートチューニング, 第97回パワーエレクトロニクス研究会資料 (1992)
- 12 岩崎, 佐藤 : メカニカルシステムの制御定数と限界速度の自動設定, ロボティクス・メカトロニクス講演会'93, IC7 (1993)
- 13 岩崎 : 機械系パラメータの自動計測と制御系の適応技術, 平成5年電気学会産業応用部門全国大会シンポジウム, S.10-5, S259-S262 (1993)
- 14 岩崎, 佐藤, 森田 : 高精度軌跡制御のためのサーボ系のオートチューニング, 機械学会関西支部第69期定期総会講演会, F405 (1994)
- 15 牧田, 岩崎, 馬場 : 学習型カム曲線を用いたモータ指令値生成法, 1994年精密工学会春季大会講演論文集, 1027-1028 (1994)
- 16 佐藤, 岩崎, 森田 : 駆動系と加工系のモデルを用いたドリル折損予知方式, 1996年精密工学会春季大会講演論文集, 561-562 (1996)
- 17 T. Ericsson, T. Iwasaki K. Maekawa and A. Morita : Control System Design Automation for 2-Mass Spring System Using LMI, 第40回システム制御情報学会講演会論文集, 449-450 (1996)